TESIS
IC998

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

" INVESTIGACION DE LAS CORRELACIONES ENTRE PRECIPITACION° NIVELES PIEZOMETRICOS Y DESPLAZAMIENTOS PROFUNDOS Y SUPERFICIALES DE UN DESLIZAMIENTO "

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: .....

JURADO EXAMINADOR

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre: Ing. Cira Hernández	Nombre: Ing. Hugo Pérez	Nombre: Ing. Roque Garcia

REALIZADO POR	Bachiller Anna Lorena Ferri M.
PROFESOR GUIA	Ing. Cira Hernández
FECHA	29 de Mayo de 1998

Agradecimientos

Este Trabajo Especial de Grado requirió la colaboración de personas que desinteresadamente ofrecieron su tiempo y atención. En especial quisiera agradecer al Ingeniero Feliciano De Santis y a todo el personal de su oficina, por dedicarme el tiempo y la paciencia que tanto necesitaba, además de orientarme de la mejor manera. Entre las personas y las empresas que más colaboraron con este Trabajo se pueden mencionar los siguientes:

- Cira Hernández de Pérez
- Eduardo Mier y Terán
- Fancisco Silva
- Miguel Guerrero
- Monica Muci
- Arthur D. Little de Venezuela
- PDVSA Servicios
- Ing. Roberto y Francisco Centeno
- Andrés Pesti, padre e hijo.
- Luis Nuñez (INTESA)
- FUNVISIS
- Graziella Ferri
- Daniel Vitale
- Mauricio van Dam
- Hugo Pérez A.
- Roque Garcia
- Francisco Ferri
- Jesús Romero
- Ingenieros De Santis C.A.

Indice General

AGRADECIMIENTOS I

INDICE GENERAL II

INDICE DE FIGURAS IV

SINÓPSIS V

1. ANTECEDENTES. DESCRIPCIÓN DEL DESLIZAMIENTO, CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS. 1

1.1 UBICACIÒN 1
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA 1
1.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS 2
1.4 LITOLOGÍA DE LA ZONA 4
1.5 CAUSAS DEL DESLIZAMIENTO. 5
1.6 MEDIDAS CORRECTIVAS 5

2. INSTRUMENTACIÓN 8

2.1 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA INSTALADA 8
2.2 INCLINÓMETROS 8
2.2.1 Características Generales 8
2.2.2 Manejo de la Información 10
2.3 PIEZÓMETROS 10
2.3.1 Características Generales. 10
2.3.2 Manejo de la Información 11
2.4 SISTEMA AUTOMATIZADO DE VIGILANCIA (VIGILOG) 11

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO 13

3.1 TRABAJOS PREVIOS 13
3.2 METODOLOGÍA APLICADA 14

4. CORRELACIÓN LINEAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL MOVIMIENTO SUPERFICIAL DEL DESLIZAMIENTO 16

4.1 PROCESAMIENTO DE LA DATA 16
4.2 VELOCIDAD DIARIA 16
4.2.1 Análisis de Resultados 17
4.3 VELOCIDAD MENSUAL 17
4.3.1 Análisis de Resultados 18

5. CORRELACIÓN LINEAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL MOVIMIENTO PROFUNDO DEL DESLIZAMIENTO 19

5.1 PROCESAMIENTO DE LA DATA 19
5.2 VELOCIDAD ANUAL 19
5.2.1 Análisis de Resultados 20

6. CORRELACIÓN LINEAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL NIVEL PIEZOMÉTRICO DEL SUELO. 21

6.1 PROCESAMIENTO DE LA DATA 21
6.2 NIVEL PIEZOMÉTRICO 21
6.2.1 Análisis de Resultados 21

7. CONCLUSIONES 23

8. RECOMENDACIONES 25

9. FIGURAS Y GRÁFICOS 26

10. BIBLIOGRAFÍA 41

Indice de Figuras

FIGURA N°1 UBICACIÓN DE LA PLANTA CANTINAS.....26

FIGURA N°2 DESLIZAMIENTO CON DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES.....27

FIGURA N°3 SECCIÓN TRANSVERSAL A-A 28

FIGURA N°4 MEDIDAS ADOPTADAS EN LA PLANTA CANTINAS.....29

FIGURA N°5 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA INSTALADA.....30

FIGURA N°6 UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ESTUDIADOS EN LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN–MOVIMIENTO PROFUNDO.....31

FIGURA N°7 UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ESTUDIADOS EN LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN–NIVEL PIEZOMÉTRICO.....32

Sinopsis

Este trabajo especial de grado se realizó con el fin de estudiar las posibilidades de predecir las velocidades superficiales y profundas de un deslizamiento, así como el nivel piezométrico de la zona, a partir de ecuaciones de correlación con los factores que controlan la velocidad de un deslizamiento. Las ecuaciones analizadas permiten estimar la velocidad del deslizamiento y el nivel piezométrico en función de los valores de precipitación instantáneos o acumulados hasta para períodos de 120 días.

El estudio de éstas relaciones puede ser de gran utilidad ya que se trata de un deslizamiento que afecta las instalaciones de la planta que suministra el 40% de la gasolina y kerosene al área metropolitana, por lo que debe asegurarse la efectividad de las operaciones de la planta

Al analizar los resultados obtenidos pudimos concluir que la precipitación que se mide en la zona de la planta, no parece ser la fuente de agua que origina el aumento de presión de poros que reduce la resistencia de los suelos residuales que allí se encuentran, ya que los factores de correlación en todos los casos son menores del 40%. Es por ello que se recomienda la construcción de una caseta con un pluviómetro en la zona de la cordillera del Avila, además de la instalación de un medidor de la evapotranspiración, para poder realizar posteriormente los estudios necesarios.

1. Antecedentes. Descripción del Deslizamiento, Causas y Características.

1.1 Ubicaciòn

El deslizamiento se ubica en el valle de Tacagua, afectando las instalaciones de la Planta que suministra el 40% de la gasolina y kerosene al àrea metropolitana, situada en el kilòmetro 3 de la carretera vieja que conduce a La Guaira [11] (ver figura N°1).

1.2 Características de la Planta

El área de planta se desarrolló sobre un estribo perpendicular a la cordillera de la Costa, sobre el cual se realizaron mucho antes de la construcción de la planta, algunas modificaciones de la topografía. Desde los años cuarenta, estos terrenos estuvieron destinados a talleres y depósitos del ferrocarril Caracas-La Guaira.

Posteriormente, el área principal de la Planta fue nivelada para su construcción, con terrazas más bajas para patios de tanques de almacenaje, y otras actividades auxiliares. Durante esta primera etapa no se reportaron problemas asociados al comportamiento defectuoso de los suelos o procesos de inestabilidad asociadas o relacionadas con la geodinámica externa y mucho menos donde se involucren procesos tectónicos.

En 1989 se reportaron las primeras grietas en la zona Nor-Oeste de las áreas de operaciones que causaron daños en las zonas pavimentadas, al edificio administrativo, a algunos tanques y a otras instalaciones menores. Como resultado de la investigación geotécnica inicial se determinó que la planta está afectada por un macro deslizamiento que abarca un área aproximada de 6 hectáreas (ver figura N°2). El deslizamiento presenta una fuerte componente horizontal de movimiento, con escasa rotación y velocidades que varían desde 2 a 3 mm/mes en la corona o parte anterior del deslizamiento hasta 50-60 mm/mes en el talud principal o borde del mismo[11].

Debido a la importancia estratégica de la planta para la ciudad de Caracas, no vislumbra con facilidad una reubicación de la misma, ya que luce factible y económicamente viable cumplir con programas de remediación y seguimiento, cuyo objetivo principal es disminuir las velocidades del deslizamiento, permitiendo así que la planta se acerque a su vida útil la cual se estima en unos 20 años adicionales [1].

Es por ello que se implementó un Programa Geotécnico y Ambiental de Seguridad, el cual tiene como finalidad por un lado, orientar la investigación para mejorar el conocimiento del problema y por lado diseñar y ejecutar las medidas de control del deslizamiento y realizar el seguimiento de sus efectos en el comportamiento.

1.3 Antecedentes Históricos

La historia de esta planta se inicia en 1957 cuando la empresa trasnacional Shell decide construir la planta en los terrenos del antiguo ferrocarril. La ubicación escogida esta asociada a la posición estratégica del lugar, muy cerca del puerto y a una cota suficiente para suministrar por camiones cisternas combustible a la ciudad.

Para la construcción se aprovechó el tope de un estribo, sobre el cual se realizó un movimiento de tierra que consistió en bajar la rasante en la parte norte del terreno para aprovechar los materiales cortados para rellenar sendas quebradas ubicadas en la parte este y oeste del estribo mencionado. Ambos rellenos fueron debidamente controlados y drenados mediante la colocación de subdrenes los cuales se aprecian con nitidez en las fotografías aéreas de 1959 (F. De Santis , Com. Pers. ,1998).

Como parte del proceso de nacionalización de la industria petrolera, la planta pasó a ser gerenciada por la empresa Maraven a partir de 1976. Desde esta fecha, la planta trabajó a un ritmo moderado hasta 1989, fecha en la cual fue adquirida por Lagoven con la finalidad de realizar ampliaciones que pudieran suministrar junto a la planta de Guatire todo el combustible de Caracas, ya que la planta de Nueva Caracas, ubicada en la ladera frontal, estaba recibiendo presiones sociales por las personas que habitan en sus alrededores.

A raíz de la construcción del edificio administrativo ubicado en la parte noroeste de la planta, se verificaron los primeros daños asociados a problemas geotécnicos importantes, los cuales se caracterizaron por un agrietamiento severo de la estructura con deformaciones diferenciales que alcanzaron más de 25 cm en el primer año, lo cual obligó a la utilización de fundaciones que compensaran los movimientos. Esta solución no significó un remedio para el edificio y este a los dos años tuvo que ser demolido. La pérdida de este edificio significó una preocupación para Lagoven y es el punto de partida de los innumerables estudios realizados en la planta cuyo resultado fue la ubicación y caracterización de un megadeslizamiento que afecta negativamente más del 50 % del terreno útil de esta infraestructura, limitando los planes de desarrollo y expansión.

Los estudios preliminares dieron paso a un programa de seguridad geotécnica cuya principal función es la búsqueda de soluciones alternativas de desarrollo sostenibles en el tiempo, complementando el plan de vigilancia en atención a evaluar la efectividad de las medidas y para proteger la seguridad de los operadores y usuarios.

En la tabla N°1 se presenta en forma cronológica y resumida los principales eventos asociados a la vida de la planta.

Fecha	Eventos
1957	Shell construye Planta Cantinas
1987	LAGOVEN asume suministro área metropolitana
1989	Construcción del edificio administrativo
1991	Grietas y fisuras en el edificio administrativo
	Inicio de mediciones en el edificio
	Estudio hidrológico por HIDROMET
1993	Instalación de 3 piezómetros en el talud EN
	Instalación de placas de rotación por FUNVISIS
	Desalojo parcial del edificio administrativo
	Pavimentación de vía perimetral Oeste.
1994	Instalación de piezómetros PC-17, 19, 20, 21 y 22.
	Instalación de inclinómetro IC-19, 23, 24, 25.
	Comienza el control de infiltración
1995	Instalación de red sismológica por FUNVISIS
	Comienza reubicación de drenajes por MGA/CIVILMET

	Comienza instalación de 3 inclinómetros y de 7 piezómetros por INGEOTEC
1996	Se instalan los primeros pozos RW-4 al 11
	Perforación, construcción e instalación de 7 drenes horizontales
1997	Perforación, construcción e instalación de los pozos de alivio RW-12 al 23
	Demolición del edificio administrativo
	Funcionamiento del equipo de vacío

Tabla N°1 Principales eventos asociados a la vida de la Planta.

1.4 Litología de la Zona.

La zona afectada se encuentra en el sector medio alto del valle de Tacagua, restringida a su margen norte. Esta se ubica dentro del área de influencia tectónica del sistema de fallas Tacagua – El Avila.

En la figura N°3 se presenta la sección transversal A-A, que se encuentra cerca del centro del deslizamiento. La figura presenta el perfil litológico de las perforaciones realizadas en esa zona y la definición de la superficie de deslizamiento. En el perfil se encuentran cuatro tipos de suelo, son el relleno, el coluvio, el esquisto, y la brecha de falla [3].

En la tabla N°2 se presentan los parámetros de suelo utilizados en los análisis de estabilidad. Debido a su baja resistencia al corte, la brecha de falla controla en gran parte la estabilidad de los taludes.

Tipo de Suelo	**Peso unitario total (Ton/m^3)**	**Angulo de Fricción (grados)**	**Cohesión (Ton/m^2)**
Relleno	2.2	23.0	0.0
Coluvio	2.3	25.0	0.0
Esquisto	2.3	35.0	0.0
Brecha de Falla	2.4	10.0	0.0

Tabla N°2 Características de los suelos encontrados en el deslizamiento.

Los instrumentos geotécnicos ubicados en el Este y Sur de la planta no muestran evidencia de movimientos profundos, superficiales, condiciones desfavorables, ni presiones de poros muy altas.

1.5 Causas del Deslizamiento.

En lo referente a las causas del deslizamiento, se han manejado diferentes hipótesis de las cuales mencionaremos las más resaltantes.

En primer lugar están las fuentes de inestabilidad natural asociadas a la topografía original, en donde se presume que la falla activa de Tacagua contribuyó a la trituración y meteorización de una capa de suelo dando origen a la brecha de falla, material de muy poca resistencia al corte y como se dijo anteriormente controla la estabilidad del deslizamiento.

En cuanto a las modificaciones realizadas a la topografía original se puede resaltar que en 1957 cuando se decide construir la Planta se observó que la topografía original era muy accidentada y en forma de península, por lo que se ampliaron las áreas planas potencialmente aprovechables; esto se logró por medio del terraceo de las áreas por encima de la cota 860 y relleno de las áreas más bajas en donde se encontraban las cabeceras convergentes de dos quebradas que drenaban a la Quebrada Cantinas.

Se presume que al rellenar las quebradas se afectó el drenaje natural de la cordillera que junto con el agua acumulada de las operaciones de la planta, originó el incremento del nivel freático en la zona. Este incremento en el nivel freático se traduce en un aumento de la presión de poros, disminuyendo la resistencia de los suelos residuales que existen en la zona.

1.6 Medidas Correctivas

Como consecuencia de lo mencionado con anterioridad se determinó que para reducir el nivel de agua sobre la superficie del deslizamiento había que controlar las

infiltraciones que eran producto de las actividades industriales de la planta a lo largo de los años.

Por este motivo a mediados de 1994 se realizó un plan de mejoramiento y reparación de los sistemas de drenaje de aguas de lluvia, aguas negras y aguas contaminadas en la planta; el plan comprendía la reubicación en superficie y reparación de los drenajes y otras tuberías enterradas de aguas servidas o contaminadas con hidrocarburos, pavimentación de todos los patios de tanques, sellado de grietas en patios y vías de acceso, logrando reducir los niveles piezométricos medidos en los instrumentos existentes a la fecha. Paralelamente se instalaron 11 pozos de alivio, generando una reducción promedio adicional del nivel piezométrico de 3 metros sobre toda la superficie del deslizamiento.

A principios de 1996 se decidió instalar drenes horizontales para reducir los niveles piezométricos en el talud Nor-Oeste y el área bajo los patios de tanque #1 y #2 , debido a que el efecto beneficioso de los pozos verticales de alivio no se extendía hasta la zona. El proyecto consistió en perforaciones de 5 cm. de diámetro y de 150 a 200 metros de longitud cada uno, dispuestos en abanico. Se inició con un proyecto para instalar 7 drenes, de los cuales solo cuatro están descargando agua de manera contínua (15 lts/min entre los cuatro) [4].

También se consideró la ampliación de la red de pozos de alivio en otras áreas de la planta, a lo largo de la carretera perimetral Nor-Oeste y en el área de estacionamiento de gandolas.

En la figura N°4 se aprecian todas las medidas correctivas que se han implementado para el mejoramiento de las condiciones de la planta.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las medidas de adoptadas por el Programa de Seguridad Geotécnica:

Medidas Adoptadas
Instalación de 23 pozos de drenaje para reducir las presiones de poros.
Instalación de 7 drenajes horizontales.
Sellado de grietas y mantenimiento de taludes.
Reemplazo de tuberías subterráneas por tuberías superficiales.
Reemplazo o revestimiento de tuberías deterioradas.
Inspección total y reparación de la red de tuberías deterioradas.
Nivelación y pavimentación de los patios de tanques.
Reemplazo de canalizaciones eléctricas subterráneas por superficiales.
Instalación de lazos de expansión en tuberías de combustibles y de agua contraincendio.
Instalación de tuberías flexibles en conductos eléctricos.
Eliminación del riego en áreas verdes de la Planta.

Tabla N°3 Cuadro resumen de las medidas de adoptadas por el Programa de Seguridad

2. Instrumentación

La Planta cuenta con un programa de seguridad geotécnica en el cual se mantiene un monitoreo constante del deslizamiento. El seguimiento se realiza gracias a una serie de instrumentos (ver figura N°5) que se han instalado al cabo de los años [1] y que se presentan a continuación:

2.1 Instrumentación Geotécnica Instalada

INCLINÓMETROS	27 (12 activos)
PIEZÓMETROS:	
Hidráulicos	23 (21 activos)
H. Ambientales	7 (6 activos)
Eléctricos	3 (2 activos)
POZOS DE OBSERVACIÓN	18 (13 activos)
PLACAS DE ROTACIÓN	84
PUNTOS GEODÉSICOS	700
Sistema Automático VIGILOG:	
Extensómetros	4
Sensores de rotación	12
Sensores de temperatura	3
Piezómetros neumáticos	2
Pluviómetro	1

Para obtener las citadas correlaciones se utilizaron algunos de los instrumentos mencionados anteriormente y sus características se presentan a continuación:

2.2 Inclinómetros

2.2.1 Características Generales

En la Planta se han instalado 23 inclinómetros: dos (2) de 38 mm de diámetro, dieciocho (18) de 60 mm de diámetro y dos (2) de 76 mm de diámetro. Los tubos que

componen los instrumentos son de PVC, ranurados, excepto los de 76 mm que son de aluminio.

Los inclinómetros se instalan en perforaciones de rotación utilizando forros telescópicos de acero con diámetro HW (10 cm.) en los primeros metros; la profundidad de la perforación se debe seleccionar de tal manera, que su extremo inferior quede empotrado en terreno estable, por debajo de la zona afectada por el deslizamiento.

Durante su colocación, el tubo de PVC es orientado de forma tal que dos ranuras internas opuestas queden alineadas con la dirección estimada del movimiento, a estas ranuras se les da el nombre de eje principal ó eje 1-3. El otro par de ranuras del tubo (perpendicular al movimiento esperado) se designa eje transversal ó eje 2-4 [12].

Una vez introducido el tubo de PVC en la perforación, se procede a la extracción del forro de revestimiento y la inyección del espacio libre entre el tubo y las paredes de la perforación, utilizando una lechada de bentonita-cemento desde el extremo más profundo hasta que rebosa en la superficie. Los tubos inclinométricos se protegen en la superficie del terreno colocando un brocal de concreto alrededor y un tubo metálico con tapa que encierra y protege el tubo ranurado.

Las primeras mediciones se realizan unas semanas después de su instalación para que la lechada haya fraguado, las mediciones generalmente se toman de manera mensual o bimensual. Los inclinómetros se miden utilizando un torpedo métrico fabricado por Slope Indicator Company, las lecturas se toman cada medio metro, ascendiendo desde el fondo del instrumento hasta el tope del mismo. El equipo DATAMATE registra la lectura del canal A (eje 1-3) y B (eje 2-4) en cada posición del torpedo. Cuando alcanza la superficie, el torpedo se extrae, se gira 180°, se introduce por las ranuras y se comienza de nuevo el proceso de medición de las lecturas complementarias. Las lecturas de los inclinómetros se almacenan en el equipo DATAMATE vaciando luego la información en un computador personal [12].

2.2.2 Manejo de la Información.

Las lecturas transferidas por el equipo DATAMATE a la computadora personal, pasan a ser la base de datos del programa DIGIPRO desarrollado por SINCO, el cual permite analizar y graficar la información registrada en los inclinómetros de la planta.

El mencionado programa elabora gráficas de deformación vs. cota (profundidad), determinando así la superficie de deslizamiento que indica cada instrumento [5].

2.3 Piezómetros

2.3.1 Características Generales.

En la planta se han instalado hasta la fecha (23) piezómetros del tipo Casagrande, con el propósito de estudiar las presiones de poro que actúan sobre la superficie del deslizamiento.

Para instalar el instrumento se debe hacer una perforación en rotación tipo telescópico hasta llegar a la superficie de deslizamiento determinada previamente por los inclinómetros.

El instrumento consiste en una tubería de PVC que sale de la superficie de la perforación y termina en una punta porosa a la cual se le coloca alrededor un filtro de arena, esta zona del piezómetro se conoce como zona de captación, cuando el nivel de agua sube o baja la presión de poros aumenta ó disminuye.

El proceso de medición es muy sencillo, para ello se necesita un instrumento electrónico llamado "Water Level Indicator" este instrumento consiste en una sonda métrica, enrollado en un carrete electrónico que posee un bombillo y un timbre que indican el contacto del sensor con el agua, además tiene un control de sensibilidad para amoldarse a las condiciones de humedad del pozo [14].

2.3.2 Manejo de la Información

Los datos de las cotas del nivel de agua medidas en cada piezómetro se encuentran en una base de datos en un computador personal, con lecturas desde el año de 1993.
En el computador existe un programa llamado PROTEO que grafica la data y se analiza con frecuencia.

2.4 Sistema Automatizado de Vigilancia (VIGILOG)

Debido a la importancia vital y estratégica de la Planta, se implementó un sistema de adquisición de datos en continuo que permitiera disponer de información instantánea sobre la evolución de los movimientos y de la zona inestable de la Planta.

El sistema recibe e interpreta la data de las mediciones registradas cada 3 segundos por los sensores instalados en campo y los evalúa para verificar si sobrepasan los umbrales previamente introducidos; en caso de ser negativo, el sistema espera el intervalo de tiempo escogido (30 min.) para almacenar una nueva medición de los sensores. Si la lectura excede el umbral, el sistema activa una alarma que es capaz de accionar sirenas y hacer determinadas llamadas telefónicas de manera repetitiva a las personas responsables, hasta lograr la comunicación. Los archivos pueden ser transferidos a discos flexibles para su estudio y graficación.

El grupo de sensores que está conectado a este sistema está comprendido por 4 extensómetros, 12 sensores de rotación, 3 sensores de temperatura, 2 piezómetros neumáticos y un pluviómetro [11].

En la tabla siguiente se muestra la ubicación de los sensores que utilizamos para la realización de las correlaciones:

Sensores	Ubicación
Extensómetro 1	Corona del deslizamiento
Extensómetro 2	Corona del deslizamiento
Extensómetro 3	Corona del deslizamiento
Extensómetro 4	Borde suroeste
Pluviómetro	Cerca del tanque de agua

Tabla N°4 Ubicación de los sensores estudiados

Los sensores de extensión o extensómetros se colocan con la finalidad de medir la separación relativa de las dos masas que conforman el deslizamiento, es decir, la separación de la masa inestable respecto a la estable.

Los mismos consisten en un mecanismo electrónico al cual se le fija un hilo de acero que se sujeta mediante bases de concreto colocadas en ambas partes de la grieta. El aparato se coloca en la zona que se mueve, el otro extremo del hilo se fija en la parte estable.

El hilo se coloca lo más paralelo posible a la dirección del desplazamiento, de manera de evitar componentes laterales que disminuyan la calidad de las lecturas.

El pluviómetro conectado al sistema es de tipo reservorio basculante, trabaja con señal electrónica emitida cada 1/20 mm de lluvia y se instaló con la finalidad de obtener un registro continuo de la lluvia, de manera de establecer las correlaciones entre la lluvia y los desplazamientos, velocidad y aceleración del sitio instrumentado.

La utilización de sistemas de vigilancia en continuo responde a la necesidad que va más allá de la instalación de instrumentos que miden o controlan determinados parámetros geotécnicos. Estos sistemas se encuentran orientados hacia objetivos de seguridad y de manejo de situaciones de contingencia con el mejor criterio ingenieril.

3. Metodología de Trabajo

3.1 Trabajos Previos

Para la realización de las correlaciones se consultaron una serie de trabajos previos relacionados con el tema, encontrando trabajos muy interesantes que influenciaron la metodología de trabajo de esta tesis.

A continuación se presenta un cuadro resumen de los trabajos más interesantes que eran necesarios dar a conocer para la mejor comprención de la metodología adoptada:

Autor	Nombre del Trabajo	Conclusiones
E. W.BRAND [9]	Predicting the performance of residual soil slopes (1985). Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong.	• La mayoría de los deslizamientos son inducidos por lluvias localizadas de corta duración y gran intensidad. • Las lluvias que ocurren en días previos a un deslizamiento no son un factor de importancia. • Una precipitación de 70 mm/hora de intensidad, parece ser el valor crítico por encima del cual ocurren los deslizamientos
C. M. WOLLE & HACHICH [16]	Rain-induced landslides in southeastern Brazil (1989). Relationship between rain and infiltration.	• Las lluvias no causan inestabilidad por si solas , deben estar acompañadas de previos períodos de lluvia de alta intensidad.
A. J. COSTA NUNES, A. M. COUTO FONSECA, C.E. DE M. FERNÁNDEZ W. CRAIZER [10]	Intense raistorms and ground slides. Rainfall intensity.	• M. Vargas y Brand correlacionan el fenómeno exclusivamente con la intensidad de la lluvia, sin importar la lluvia previa. • Guidicini & Iwasa presentan correlaciones en las que dos factores son considerados importantes: la influencia de la lluvia previa para la saturación del suelo y la intensidad de la lluvia que finalmente causará el deslizamiento.

M. VARGAS [15]	Slope stability in residual soils. Effect of rainfall in Serra do Mar (Río de Janeiro, Brazil).	• La mayoría de los deslizamientos ocurren a finales de la época de lluvia, cuando el suelo residual está completamente sobresaturado y después de una lluvia de alta intensidad.
P. POUGET [13]	Exploitation des donnes de suivi. Site de La Clapiere - Correlations entre differents parametres climatologiques et de deplacements. Etude de la relation lineaire entre vitesse et la pluie.	• Los mejores factores de correlación entre la velocidad del deslizamiento y la lluvia, se consiguieron a 120 y 140 días de lluvia previa acumulada.

Según muestra el cuadro anterior los autores C.M. Wolle, M. Vargas, Guidicini y P. Pouget proponen que debe tomarse en cuenta la lluvia previa a la ocurrencia del deslizamiento, a diferencia de E. W. Brand que opina que estas no son importantes, sino más bien que esta causa un efecto instantáneo sobre el movimiento.

3.2 Metodología Aplicada

La consulta de los trabajos previos fue el punto de partida de esta investigación, de allí se desprende la existencia de dos apreciaciones acerca de la influencia de la lluvia en el tiempo, lo que nos obliga a procesar los registros pluviométricos bajo la óptica de dos enfoques, el primero usando largos periodos de 30, 60, 90 hasta 120 días acumulados y segundo realizar las mismas correlaciones de velocidad-precipitación para periodos más cortos de 5, 10, y 15 días. De esta manera se cubren las expectativas planteadas en los reportes, de los trabajos presentados anteriormente.

Para este análisis se emplea como recurso matemático, las correlaciones basadas en el método de regresión lineal, el cual permite relacionar una variable dependiente, (en este caso la velocidad del movimiento del deslizamiento) con una variable independiente (en este caso nos referimos a la precipitación). El análisis particularmente está centrado en demostrar la relación existente entre variables dependientes e independientes, dada una cantidad *n* de datos de las dos variables.

La regresión lineal frecuentemente es utilizada para establecer funciones ó expresiones que permitan estimar un valor dependiente cuando se tiene como dato un valor independiente.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la finalidad de esta tesis es encontrar una función que nos permita predecir la cantidad de lluvia que debería caer en La Planta para que se produzca una velocidad predeterminada o un aumento del nivel piezométrico que pueda causar daños en las instalaciones y por ende, en la segura operación de La Planta. Con esta función predictiva podemos tener el control del comportamiento del deslizamiento, además de un plan de contingencia en caso de alguna tormenta.

Para poder evaluar el grado de dependencia de los datos utilizamos el factor de correlación R^2, en caso de existir una independencia equivale a probar que el coeficiente de correlación, R^2 , es igual a cero y en el caso de que sean totalmente dependientes, R^2 , es igual a 1 [7] (ver el planteamiento matemático en el Anexo-A).

Una vez obtenidos los archivos organizados de la lluvia acumulada, la velocidad de los instrumentos y los niveles piezométricos, gracias al programa EXCEL se procede a realizar los gráficos Velocidad vs. Días de Precipitación Acumulada y Nivel Piezométrico vs. Días de Precipitación Acumulada, obteniendo 7 gráficos para cada instrumento. Al obtener estos gráficos la computadora realiza una regresión lineal por mínimos cuadrados y obtiene la tendencia y el factor de correlación de los datos de cada instrumento.

Finalmente se realizan los gráficos Factor de Correlación vs. Días de Precipitación Acumulada, de los cuales se desprenderán los resultados de las correlaciones realizadas, es decir, se verá qué cantidad de lluvia acumulada es la que más relación tiene con la velocidad del deslizamiento y con la variación del nivel piezométrico del suelo.

4. Correlación Lineal entre la Precipitación y el Movimiento Superficial del Deslizamiento

Los instrumentos utilizados para este trabajo fueron los extensómetros 1, 2, 3 y 4 y el pluviómetro de la planta, (cuya ubicación se muestra en la tabla N°4 del aparte 2.4), instalados y monitoreados por FUNVISIS y el sistema VIGILOG respectivamente.

4.1 Procesamiento de la Data

En este caso se tomó en cuenta la data desde diciembre de 1995 hasta el mes de enero de 1998 y se llevó a un solo archivo. Una vez analizada la data y observando que las variaciones entre lecturas cada 30 minutos eran despreciables y que el manejo de archivos tan grandes era muy complicado, se decidió resumir el archivo de 48 lecturas (cada 30 min.) diarias a un promedio de 12 lecturas por día (cada 2 hrs.), con lo cual resultó más manejable la operación y se demostró que las tendencias de los instrumentos no se alteraban.

4.2 Velocidad Diaria

Se realizó una correlación lineal para diferentes períodos de lluvia acumulados con la finalidad de obtener una función de la forma:

$$Vdiaria = f(Precp_N)$$

Vdiaria = Velocidad diaria expresada en mm/mes.

Precp_N = Lluvia acumulada para diferentes períodos.

Los datos de lluvia diaria se sumaron y acumularon en 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 días. En cuanto al archivo de velocidad, se tomó la velocidad relativa diaria, es decir, la última lectura del día menos la primera, resultando la velocidad en mm/día y se realizó la conversión a mm/mes, para obtener valores más representativos.

4.2.1 Análisis de Resultados

Luego de realizar los gráficos mencionados en la metodología de trabajo (ver los gráficos del Anexo-B) y de analizar los gráficos "Factor de Correlación vs. Lluvia Acumulada" (ver gráficos N° 1 al 4), podemos concluir que a pesar de que el grado de correlación es muy pobre, la lluvia acumulada que tiene mayor relación con el desplazamiento superficial del deslizamiento son las lluvias entre 5 y 15 días, como se muestra en el siguiente cuadro sinóptico:

Ext. N°	Lluvia acum.	Factor R^2
1	15 días	0.0173
2	5 días	0.0015
3	10 días	0.0041
4	5 días	0.0013

Tabla N°5 Resultados de la correlación lluvia-movimiento superficial

4.3 Velocidad Mensual

Considerando que los factores de correlación R^2 obtenidos anteriormente eran bastante pobres, se utilizó el concepto de velocidad mensual promedio con el fin de minimizar lo más posible el ruido de la señal y obtener mejores correlaciones. En este caso la función que buscamos es muy similar a la anterior:

$$Vmensual = f(Precp_N)$$

Vmensual = Velocidad mensual en mm/mes.

Precp_N = Lluvia acumulada para diferentes períodos.

Para esta segunda parte del trabajo se obtuvieron los totales mensuales de lluvia (30 días) y se acumularon en, 30, 60, 90 y 120 días.

En esta ocasión se tomó la velocidad relativa mensual, restando la última lectura menos la primera lectura del mes, es decir, la velocidad promediada para todo el mes.

4.3.1 Análisis de Resultados

Al observar los gráficos realizados (gráficos del Anexo-B) para los cuatro extensómetros, además de los gráficos Factor de Correlación (R^2) vs. Precipitación Acumulada (ver los gráficos N° 5 al 8), podemos decir que aunque las correlaciones siguen siendo pobres, reflejando que no hay una relación importante entre la lluvia acumulada y la velocidad superficial del deslizamiento, los resultados son mejores que los encontrados en el aparte 4.2 del trabajo, es muy probable que esto se deba a que sólo se tomó en cuenta la primera y última lectura del mes al calcular la velocidad, percibiendo menos saltos eléctricos.

En el siguiente cuadro sinóptico se muestra que las mejores correlaciones resultaron entre 60 y 90 días de lluvia acumulada:

Ext. N°	Lluvia acum.	Factor R^2
1	30 días	0.0401
2	30 días	0.0233
3	60 días	0.1165
4	90 días	0.102

Tabla N°6 Resultados de la correlación lluvia-movimiento superficial

5. Correlación Lineal entre la Precipitación y el Movimiento Profundo del Deslizamiento

Los instrumentos utilizados para este trabajo fueron los inclinómetros, IC-5, IC-15, IC-16, IC-17, IC-19, IC-25, IC-32, e IC-36 (ver la ubicación de los instrumentos en la figura N°6), el criterio utilizado para escoger los inclinómetros que se iban a usar para las correlaciones se basó en que la duración de los mismos debía tener como mínimo un período completo de lluvia y de sequía. La precipitación se midió con el pluviómetro manual desde septiembre de 1993 hasta noviembre de 1995 y posteriormente con el pluviómetro conectado al sistema VIGILOG.

5.1 Procesamiento de la Data

La data partía desde septiembre de 1993 hasta enero de 1998 dependiendo de la duración del inclinómetro, las mediciones se tomaron mensuales y bimensuales; los archivos de lluvia y desplazamiento se llevaron a un solo archivo por inclinómetro.

5.2 Velocidad Anual

En la correlación lineal entre la lluvia y el desplazamiento profundo del deslizamiento tratamos de conseguir la función predictiva de la forma:

$$Vanual = f(Precp_N)$$

Vanual = Velocidad del día de la medición expresada en mm/año.

Precp_N = Lluvia acumulada para N períodos.

La lluvia acumulada para cada dato de velocidad fue la suma de los 5, 15, 30, 60, 90, y 120 días anteriores a la fecha de medición. La velocidad que se escogió para realizar las correlaciones fue la velocidad promedio entre dos lecturas, es decir, el desplazamiento medido un día, menos el desplazamiento de la medición anterior dividido por el intervalo de días entre las mediciones. La velocidad se expresó en mm/año para que el valor resultara más representativo.

5.2.1 Análisis de Resultados

Al analizar los gráficos del Anexo-B y los gráficos N° 9 al 16, se observa que en general no hay una relación entre la lluvia y el desplazamiento profundo del deslizamiento, pero podemos decir que en los inclinómetros IC-5, IC-15, IC-25 e IC-32, la lluvia acumulada que tiene alguna relación con la velocidad del deslizamiento es la más reciente, es decir, la acumulación de 5 días de lluvia. A diferencia de los inclinómetros, IC-17, IC-19 e IC-16, en donde los resultados más alentadores coincidieron en 120 días de lluvia acumulada. Si comparamos la relación entre la precipitación y el movimiento superficial con la relación precipitación – movimiento profundo, podemos decir que las correlaciones son mejores en el segundo caso debido a que las mediciones son más directas y no están afectadas por el ruido electrónico.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Inclinómetro	Precp. Acum.	Factor R^2
IC-5	5 días	0.0271
IC-15	5 días	0.0773
IC-16	120 días	0.1717
IC-17	120 días	0.0324
IC-19	120 días	0.0682
IC-25	5 días	0.0973
IC-32	5 días	0.0326
IC-36	30 días	0.0642

Tabla N°7 Resultados de la correlación lluvia-movimiento profundo

6. Correlación Lineal entre la Precipitación y el Nivel Piezométrico del Suelo.

Los instrumentos utilizados para este trabajo fueron los piezómetros PC- 7P, PC-16-P y PC-17P (cuya ubicación se presenta en la figura N°7), ya que presentaban la historia más larga de lecturas, desde abril de 1994 hasta enero de 1998. Las lecturas de lluvia se midieron con el pluviómetro manual hasta noviembre de 1995 y con el pluviómetro automático desde esta fecha en adelante.

6.1 Procesamiento de la Data

Los piezómetros se miden dos veces por semana por el encargado de la Planta y una vez cada dos o tres semanas por los asesores. Las lecturas que se tomaron en cuenta para la realización de las correlaciones fueron las realizadas por los asesores con una frecuencia de dos lecturas mensuales.

6.2 Nivel Piezométrico

La correlación lineal entre el nivel piezométrico y la lluvia acumulada de diferentes períodos busca una función predictiva de la forma:

$$\text{Cota} = f(\text{Precp_N})$$

Cota = Cota del día de la medición expresada en msnm.

Precp_N = Lluvia acumulada para N períodos.

La lluvia se acumuló para 5, 15, 30, 60, 90 y 120 días previos al día de la medición del piezómetro.

6.2.1 Análisis de Resultados

Al analizar los gráficos del Anexo-C y los gráficos N° 17 al 19, se observa que los tres instrumentos se comportan de manera similar, resultando la mejor correlación para los 120 días de lluvia acumulada, en el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos:

Piezómetro	Lluvia acum.	Factor R^2
PC-7P	120 días	0.23
PC-16P	120 días	0.32
PC-17P	120 días	0.21

Tabla N°8 Resultados de la correlación lluvia-nivel piezométrico.

Cabe destacar que debido a la cercanía de los piezómetros a los pozos de alivio se pensó que si se separaba el estudio en dos partes, es decir, el estudio del comportamiento de los piezómetros, antes y después de la instalación de los pozos de alivio, se encontraría que la correlación entre la lluvia y el nivel piezométrico antes de la instalación de los pozos sería mejor que la misma correlación después de ser instalados dichos pozos. Los pozos cambian por completo la hidrlogía de la planta, en el sentido que abaten el nivel freático y por lo tanto restan la influencia de la precipitación. Cuando se hizo la investigación, el resultado a nuestro entender fue contradictorio, es decir, la correlación entre la lluvia y el nivel piezométrico mejoraba después de la fecha de instalación de los pozos. Al investigar las razones de tal resultado, concluímos que puede ser el producto de un hecho casuistico; es decir, no responden a una relación vinculante. Las opiniones de los expertos que trabajan en la planta (F. De Santis, com. pers., 1998), sostienen que los pozos presentan volumenes de abatimiento reducidos y bastante irregulares debido a la complicada hidrogeología y tectónica de la zona. Además los pozos cercanos a la zona de los piezómetros estudiados no funcionaron por un tiempo debido a reparaciones de mantenimiento durante el año pasado.

Es preciso acotar que en esta parte del trabajo se consideró la separación de los datos debido a que existía más de un año de mediciones antes y después de la instalación y operación de los pozos, estudio que no pudo realizarse en las secciones 4 y 5 por escasez de información.

7. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo especial de grado es el estudio de las correlaciones entre los parámetros que controlan la velocidad de un deslizamiento, paso necesario para el inico de un programa de predicción. Este trabajo, es de gran importancia para la seguridad de las operaciones de la planta y para los programas de planificación y seguridad geotecnica.

Se han correlacionado las velocidades superficiales y profundas del deslizamiento con los niveles de lluvia, así como también con el nivel piezométrico. Los resultados indican que existen diferencias entre ambas instrumentaciones, siendo este alcance un elemento de aporte adicional al estado del arte en materia de instrumentación geotécnica de zonas inestables.

Para relacionar la precipitación y el movimiento superficial del deslizamiento, se escogieron dos velocidades distintas, la primera se basó en la velocidad diaria del deslizamiento y la segunda en la velocidad mensual. De esta manera pudimos observar que en general no hay una relación marcada entre la precipitación medida en la planta y el movimiento superficial, pero concluimos que los instrumentos de medición en continuo deben ser mejorados en el sentido de que existen muchos saltos eléctricos en la señal cuando el valor leído es muy cercano a cero.

En la relación entre la precipitación y el movimiento profundo del deslizamiento se obtuvo un mejor resultado, aunque con factores de correlación bajos ($R^2 < 0,2$). El mejoramiento de los resultados es debido a una data más limpia, libre de ruido eléctrico, ya que las mediciones son manuales. Sin embargo, la conclusión se mantiene en cuanto a que la precipitación medida en la planta no es directamente la responsable de los movimientos observados; sino más bien son los flujos de agua que están controlados por las recargas que sufre el subsuelo de la planta desde la cordillera, la cual presenta condiciones climáticas diferentes; es decir, mayor volumen de precipitación.

La correlación entre la precipitación y el nivel piezométrico presentó una mejoría en cuanto a los factores de corelación R^2 ($R^2 > 0,3$). Esta mejoría se manifiesta particularmente en la correlación realizada para el periodo posterior al inicio del bombeo por medio de los pozos de alivio (después de julio de 1995). Basta por conocer si la correlación mejora por un efecto casuístico, ya que se presume que los pozos de alivio no hayan estado en funcionamiento por problemas de mal mantenimiento que se presentaron en el año 1997, o el bombeo ha sido un factor de correción de otros efectos no considerados tales como la evapotranspiración, el tiempo de retención de agua por el suelo, etc.

No obstante, es claro que el nivel piezométrico es mucho más sensible a los niveles de lluvia que la velocidad del deslizamiento. Pareciera, que los valores pizométricos sufren cambios casi instantaneos con la lluvia; mientras que la velocidad requiere acumular un valor de precipitación pico, posiblemente cercano a 80 mm en un mes para producir un incremento en la presión, necesario para afectar los valores del movimiento y la velocidad. Lo anterior significa que se requiere remontar un cierto valor de presión y no de lluvia para afectar la cinemática del deslizamiento.

Es necesario comentar que aunque las correlaciones matemáticas no fueron alentadoras, sí existe una relación entre la disminución de la velocidad del deslizamiento y la disminución del nivel piezométrico en la zona. Esta conclusión avala las medidas de remediación empleadas actualmente en la planta, en el sentido de continuar construyendo pozos de alivio para disminuir la carga de agua sobre el plano del deslizamiento.

8. Recomendaciones

- Debido a que la precipitación que se mide en la planta no es la que está relacionada con el incremento de la presión de poros del deslizamiento, debería considerarse colocar un pluviómetro en la zona de la cordillera del Avila para poder realizar otros estudios y obtener mejores correlaciones.

- Es muy provechoso para posteriores investigaciones realizar un control de la medición del flujo extraído de los pozos de alivio, así como también la instalación de una estación que mida la evapotranspiración de la zona.

- Es preciso la eliminación de los saltos eléctricos de la señal de los instrumentos de medición en continuo, para lo cual se necesita personal especializado.

- En el caso de que se realicen más estudios acerca del tema sería recomendable la mayor acumulación posible de datos y un mejoramiento de las técnicas de muestreo.

FIGURAS Y GRÁFICOS

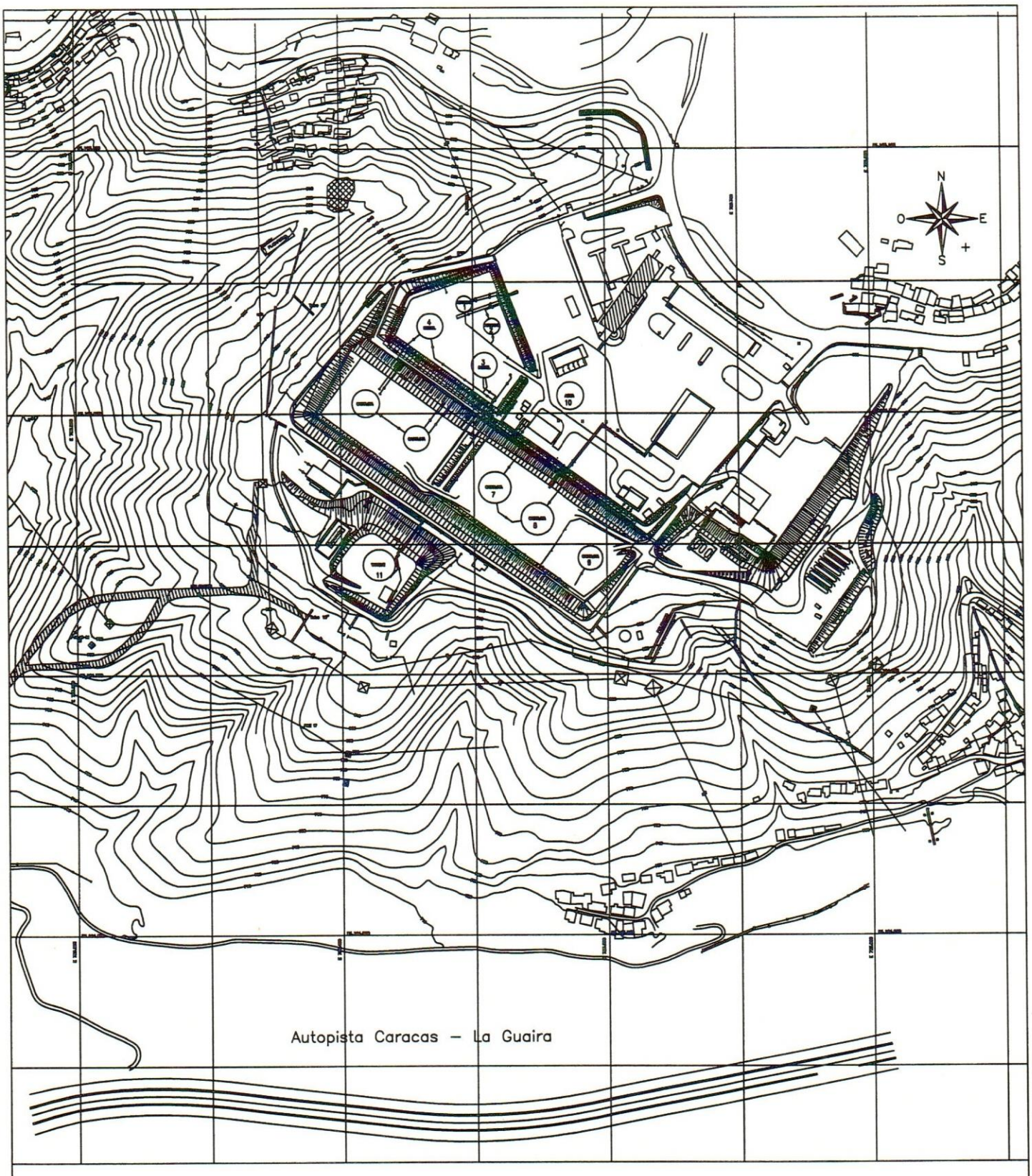


Figura No. 1 Ubicación de la Planta Cantinas

Figura No. 2 Deslizamiento con desplazamientos horizontales

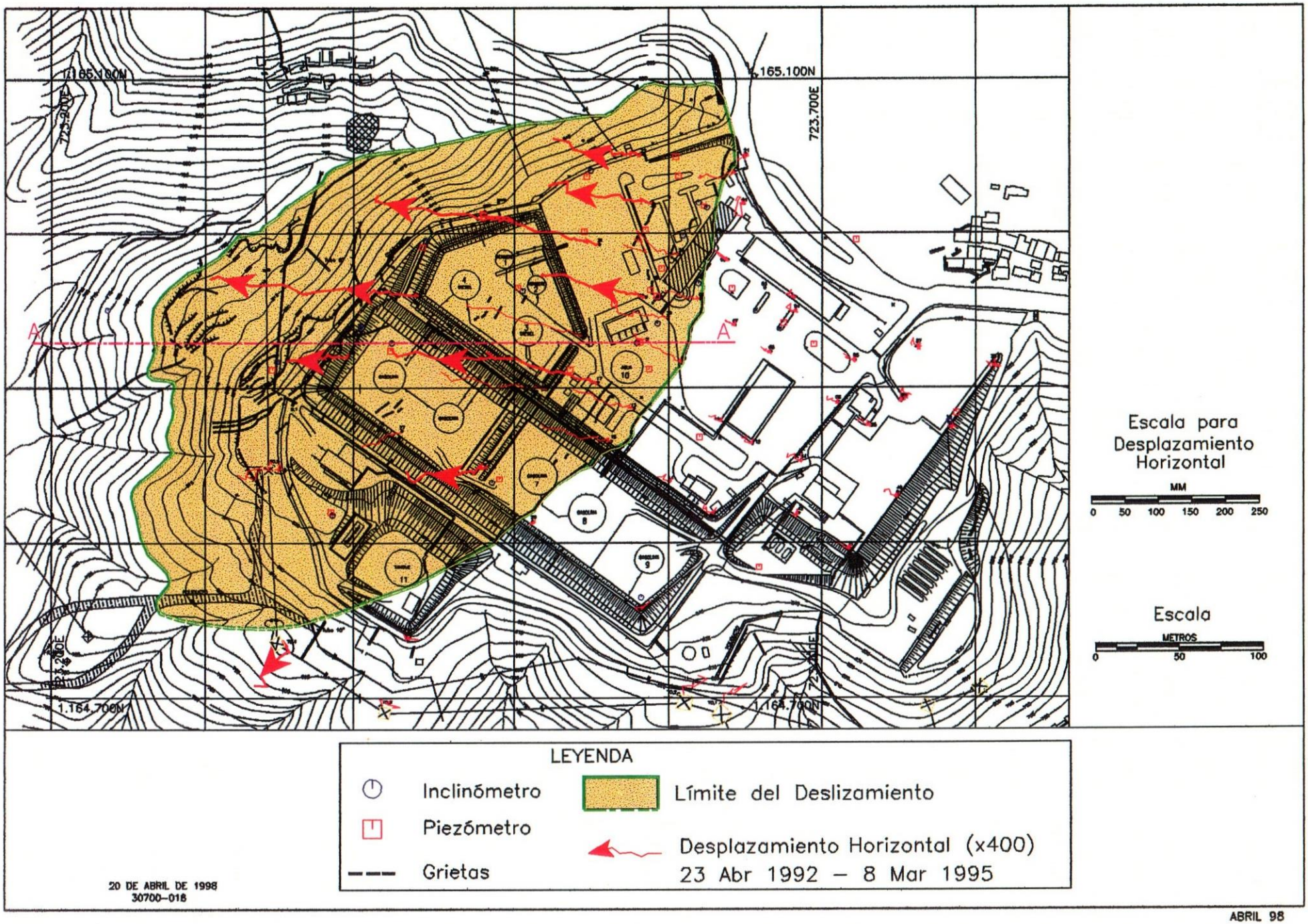
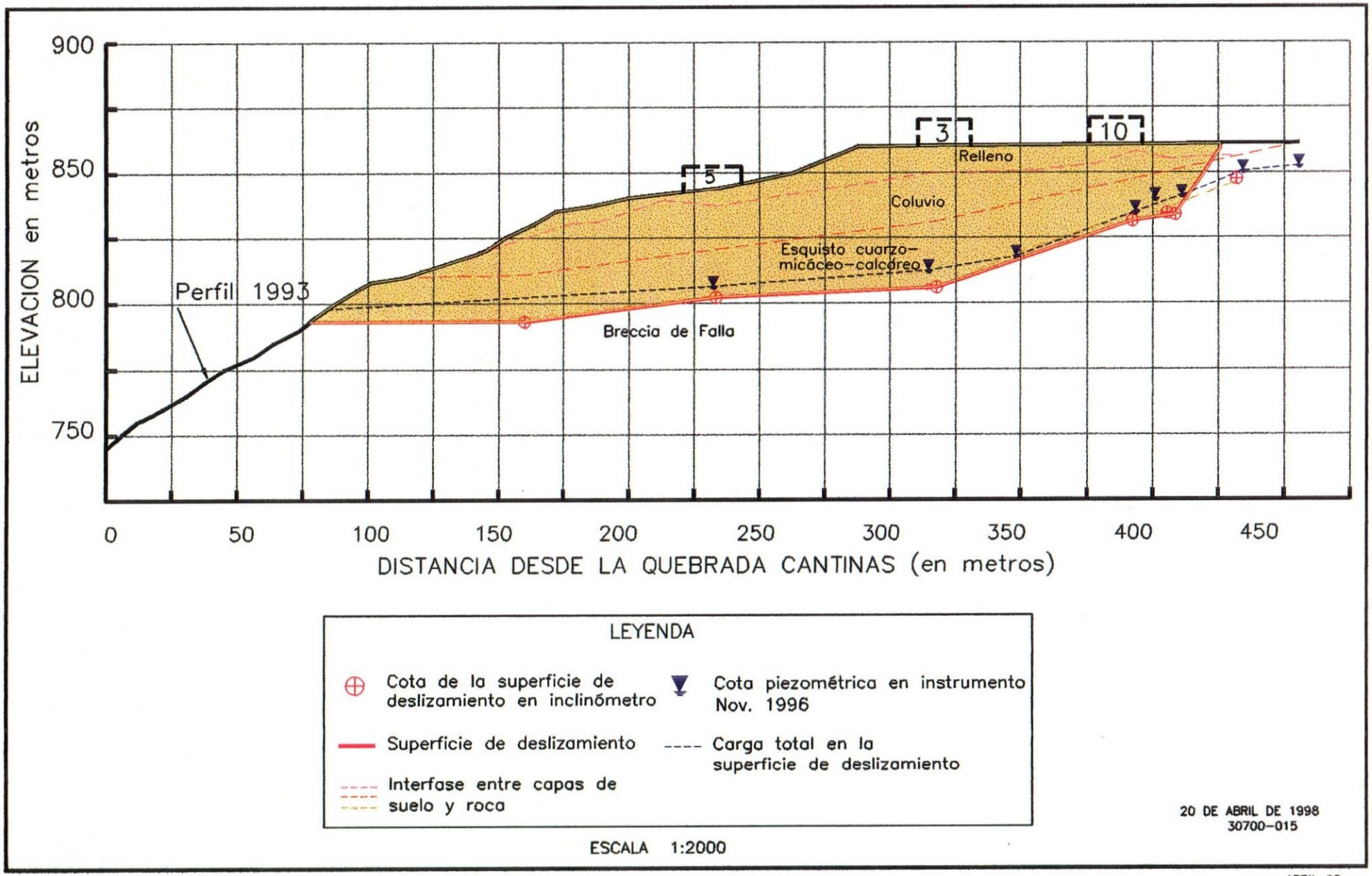


Figura No. 3 Sección Transversal A–A



ABRIL 98

Figura No. 4 Medidas adoptadas en la Planta Cantinas

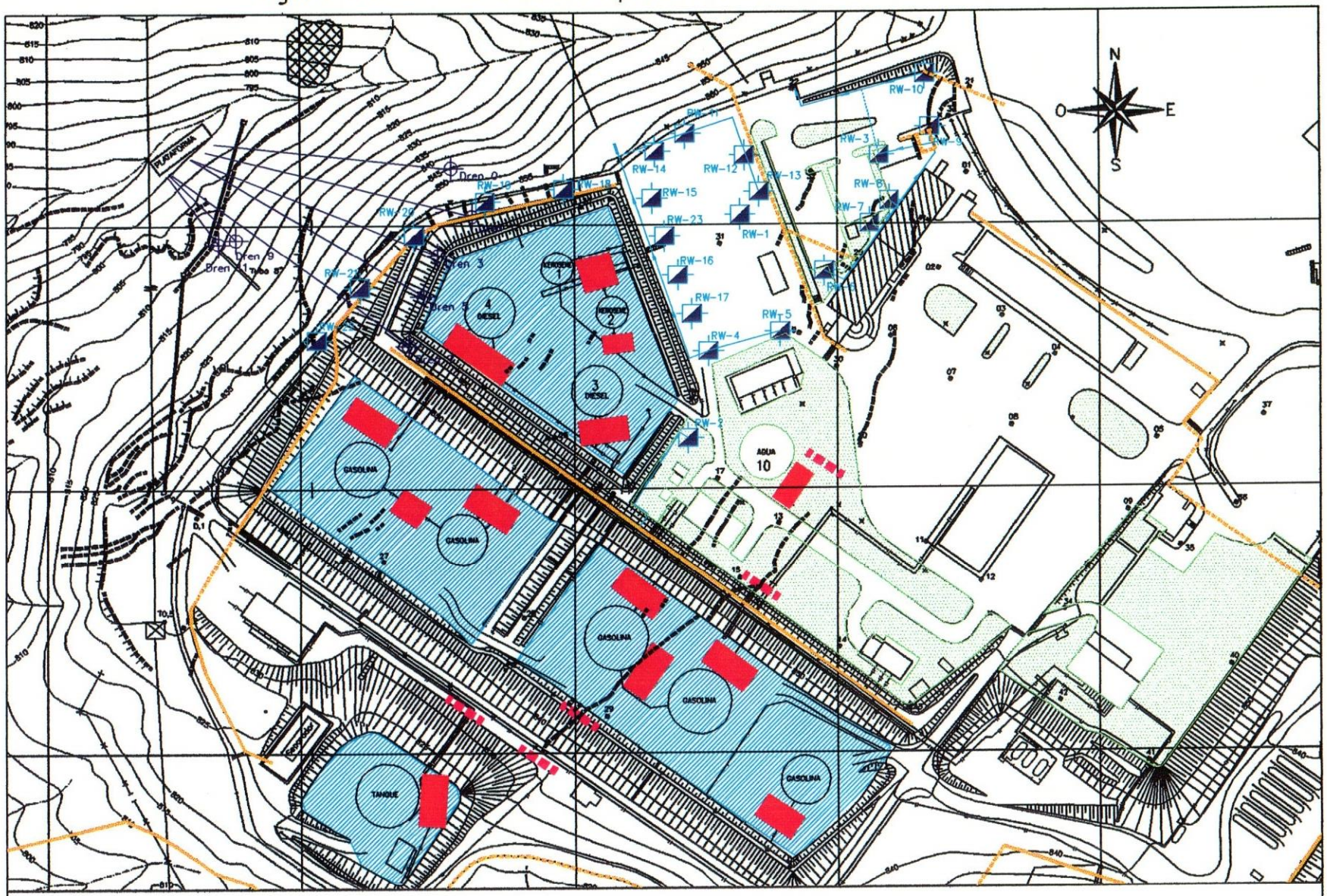


Figura No. 5 Instrumentación Geotécnica Instalada

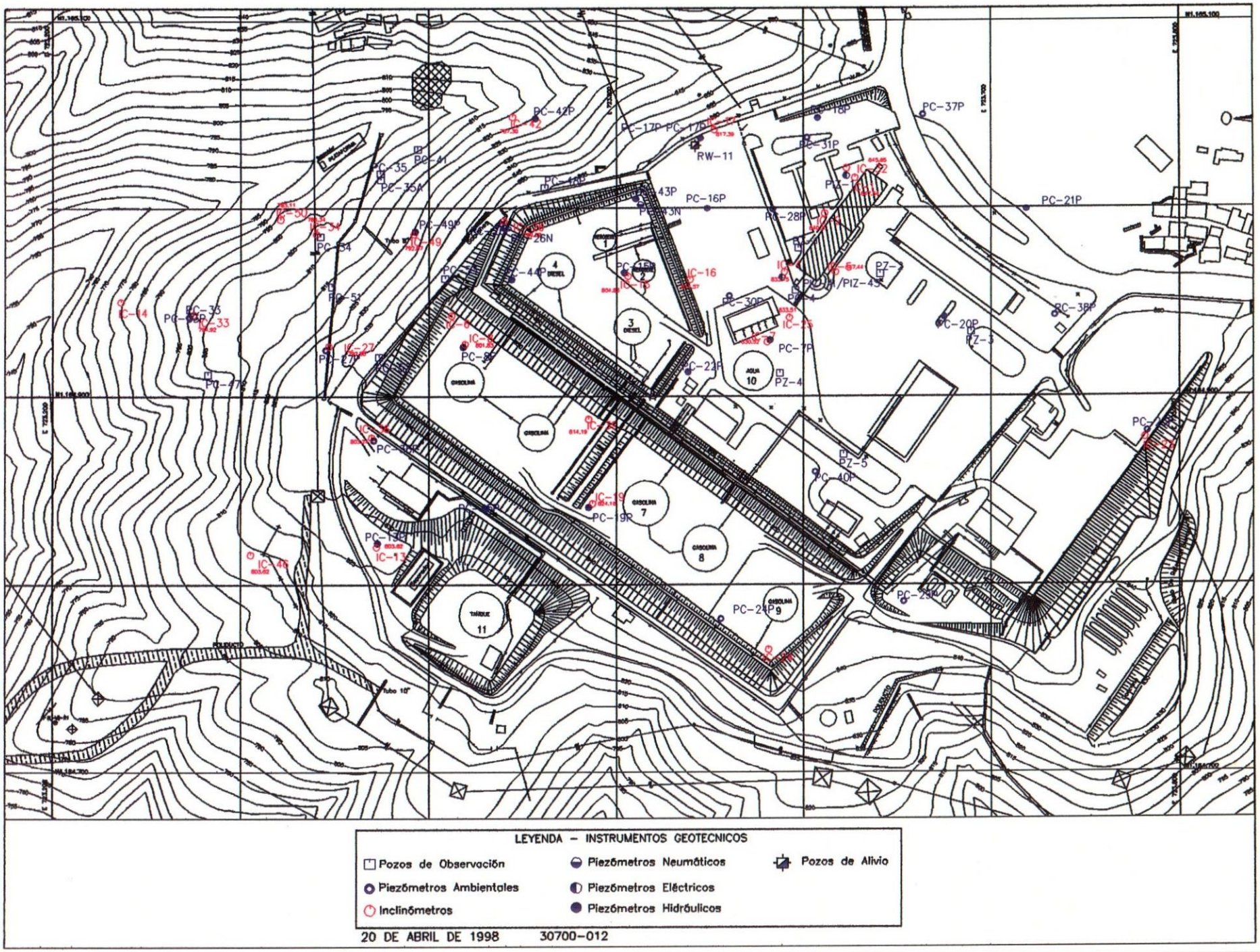


Figura No. 6 Ubicación de los instrumentos estudiados en la relación Precipitación – Movimiento Profundo

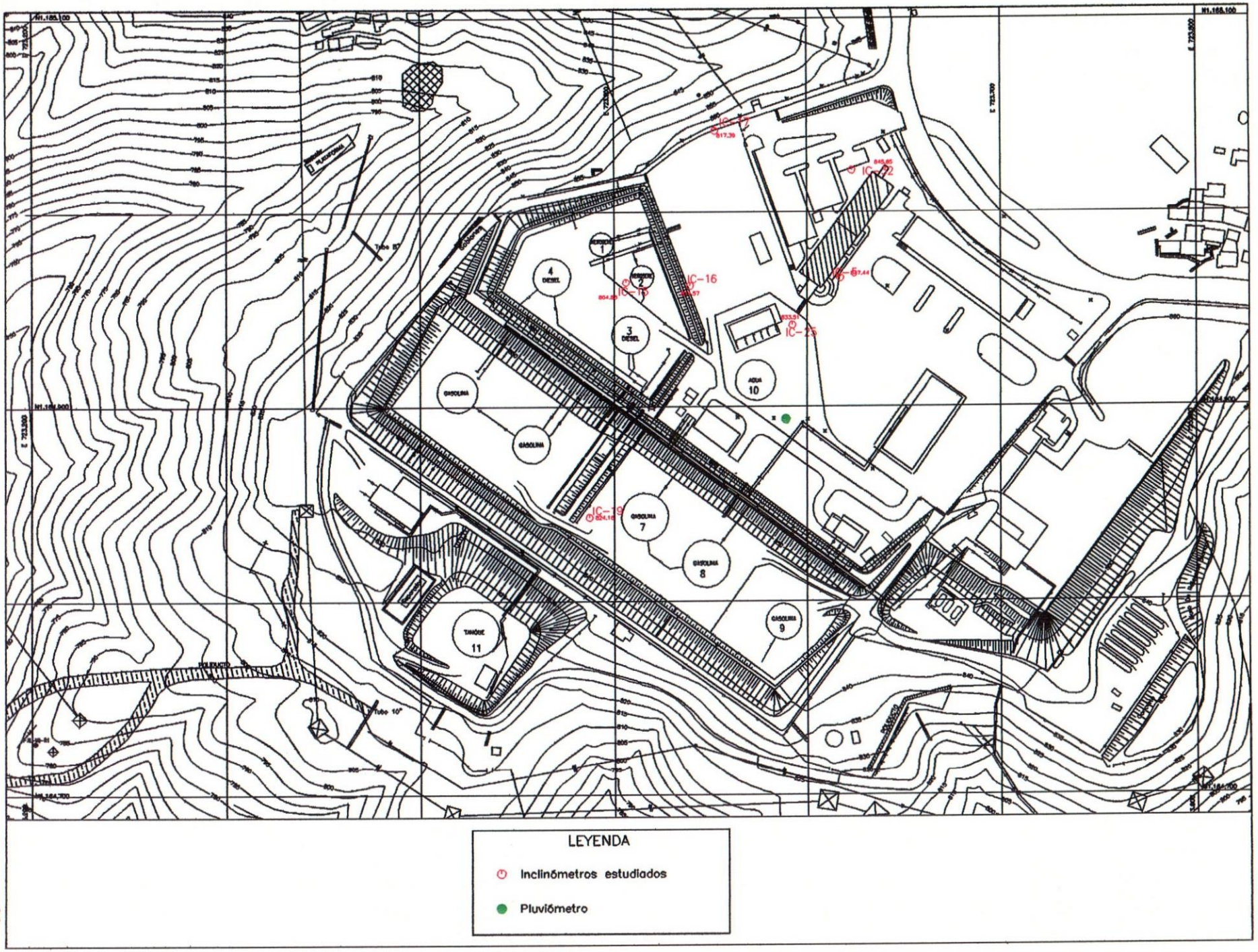
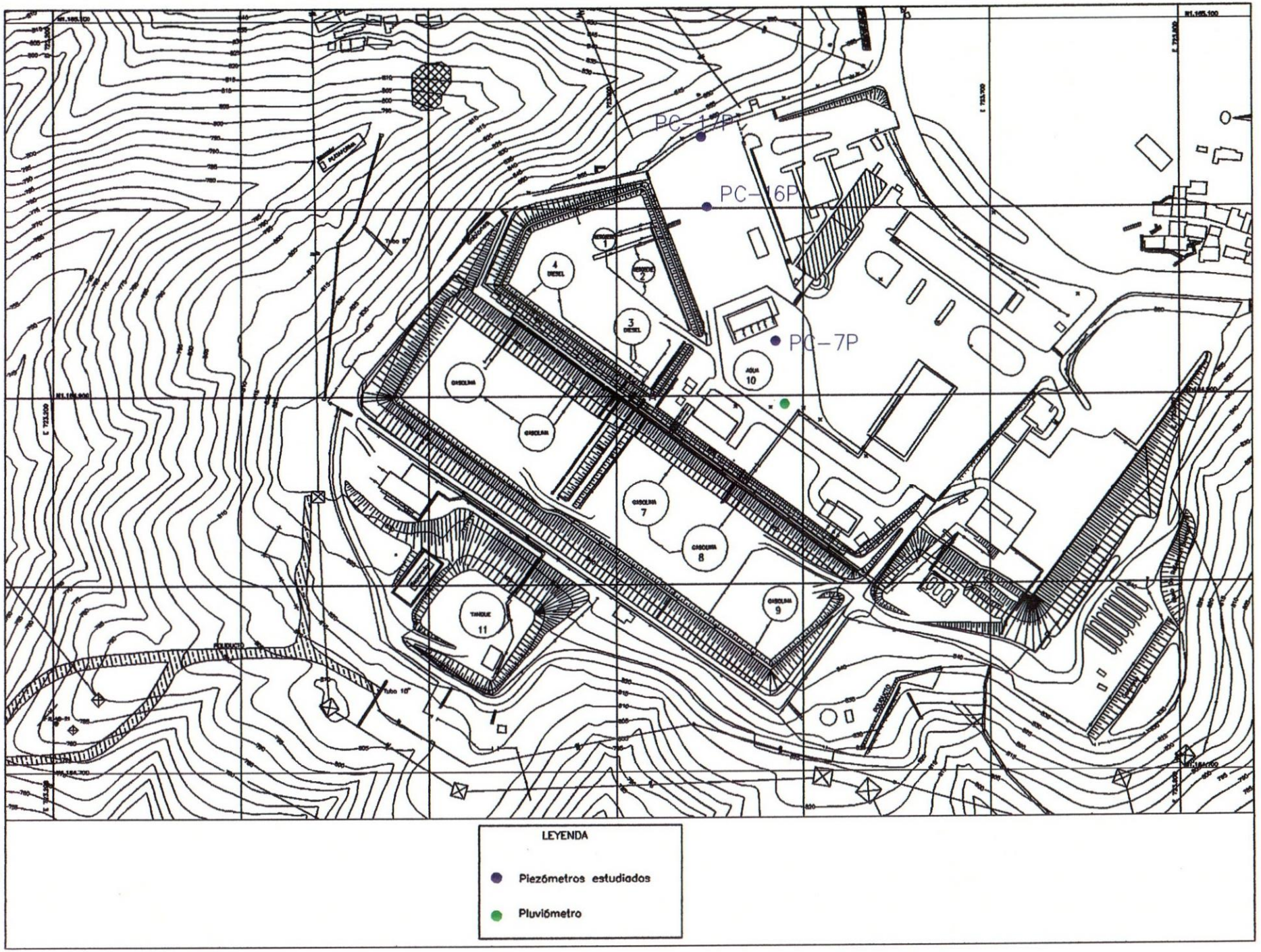
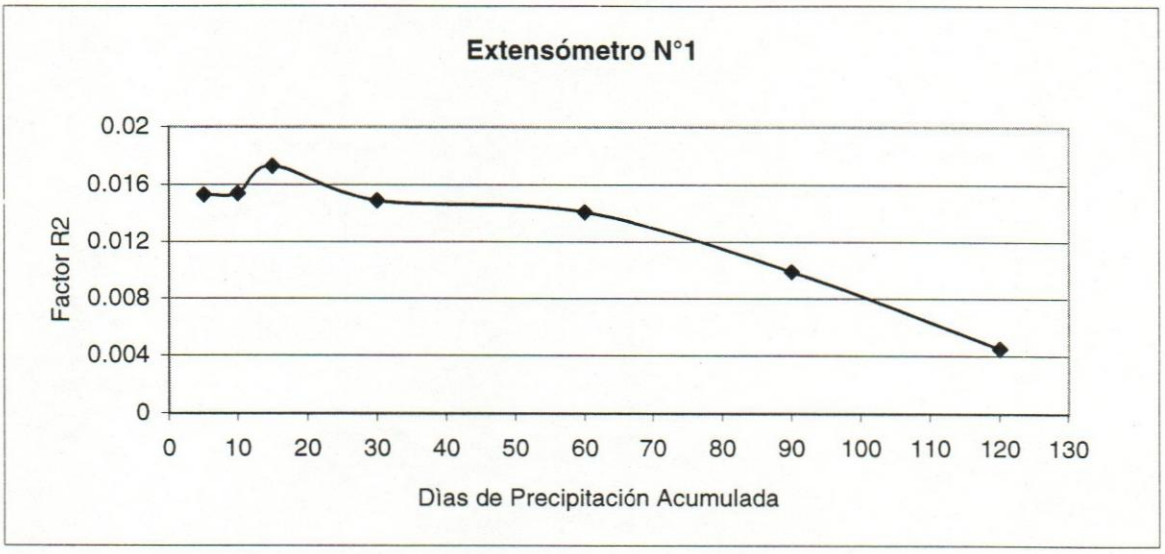
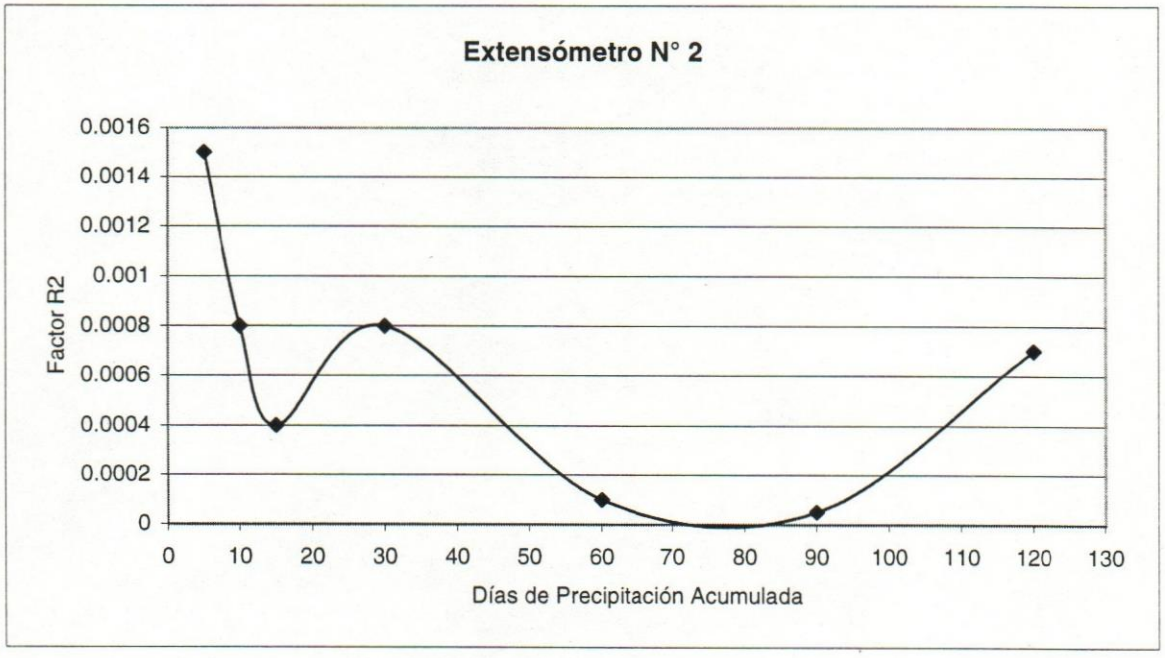


Figura No. 7 Ubicación de los instrumentos estudiados en la relación Precipitación – Nivel Piezométrico



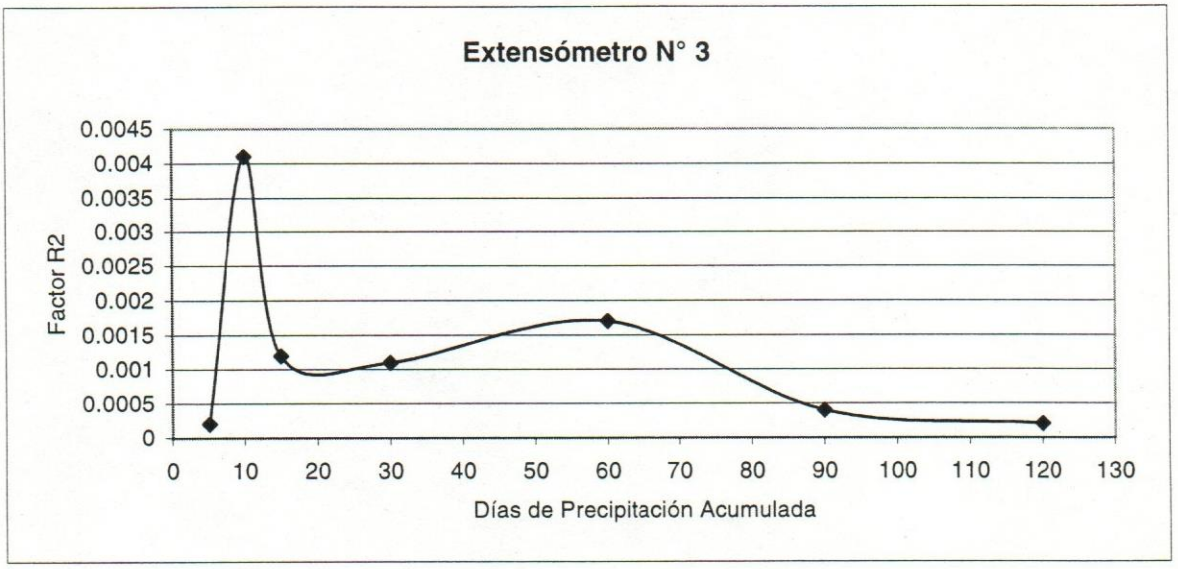
Correlación : V diaria = f (Precp_N)
Período (12/95-01/98)

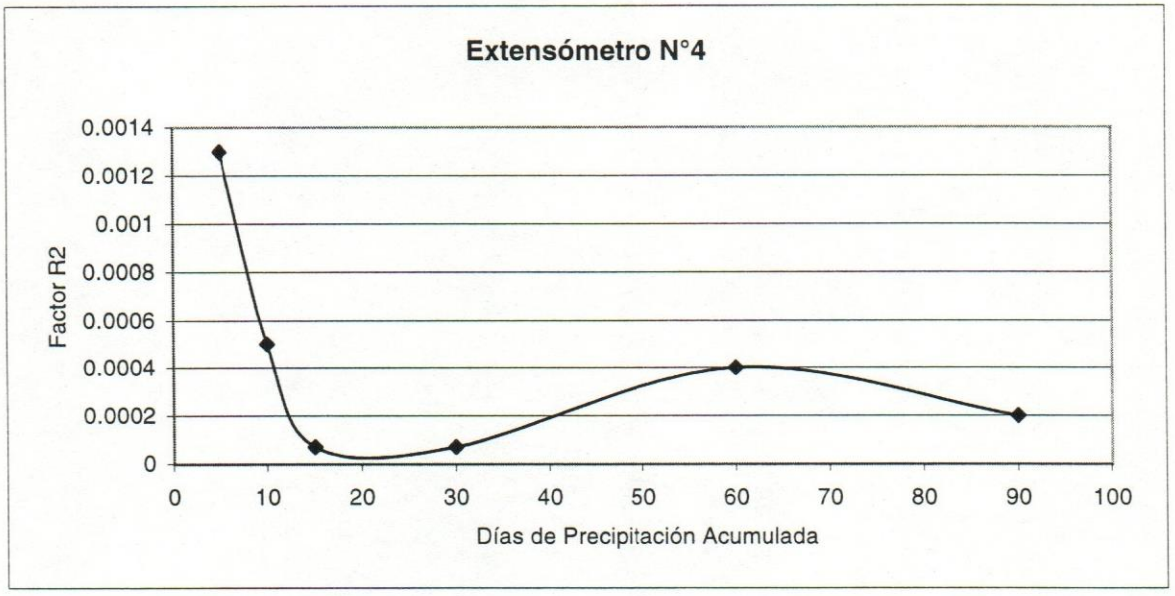




Gráficos N° 1 y 2 Resultados de la correlación lluvia - movimiento superficial

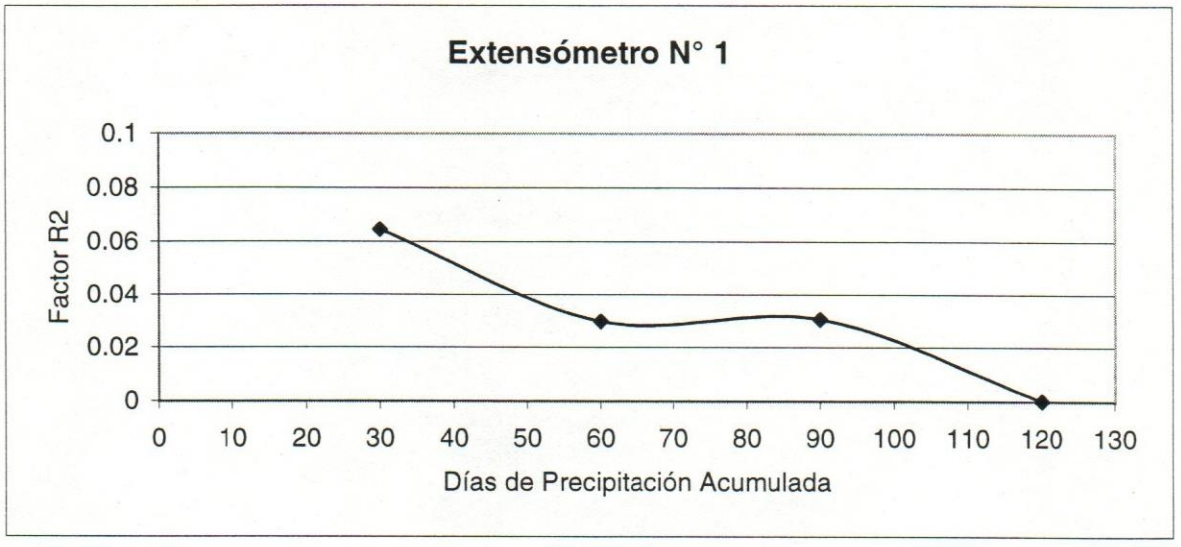
Correlación : V diaria = f (Precp_N)
Período (12/95-01/98)

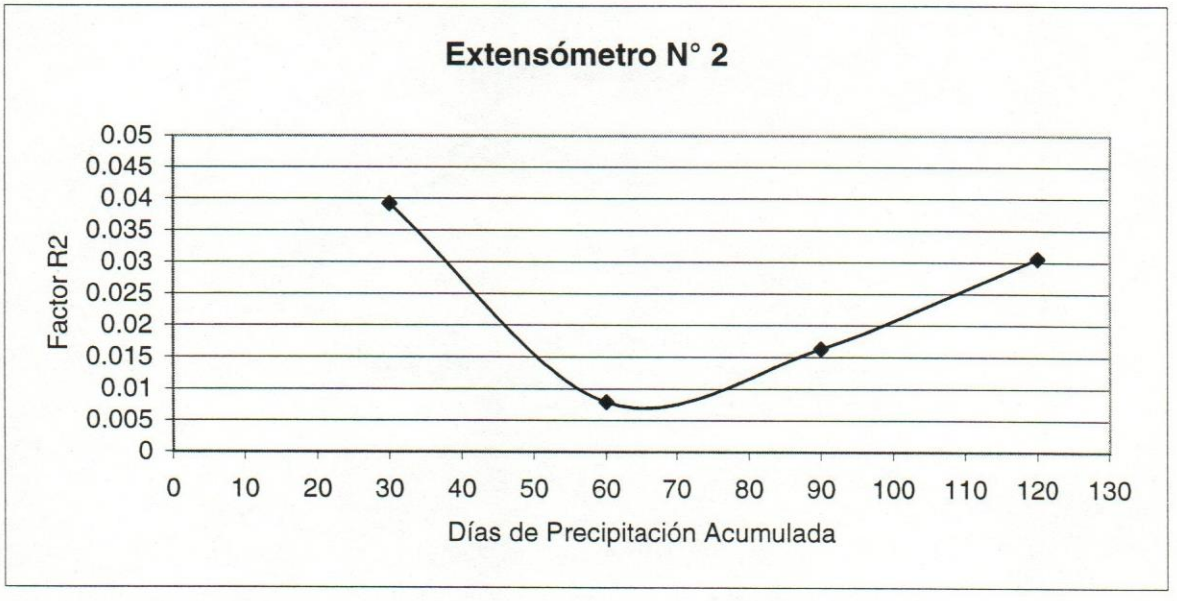




Gráficos N° 3 y 4 Resultados de la correlación lluvia - movimiento superficial

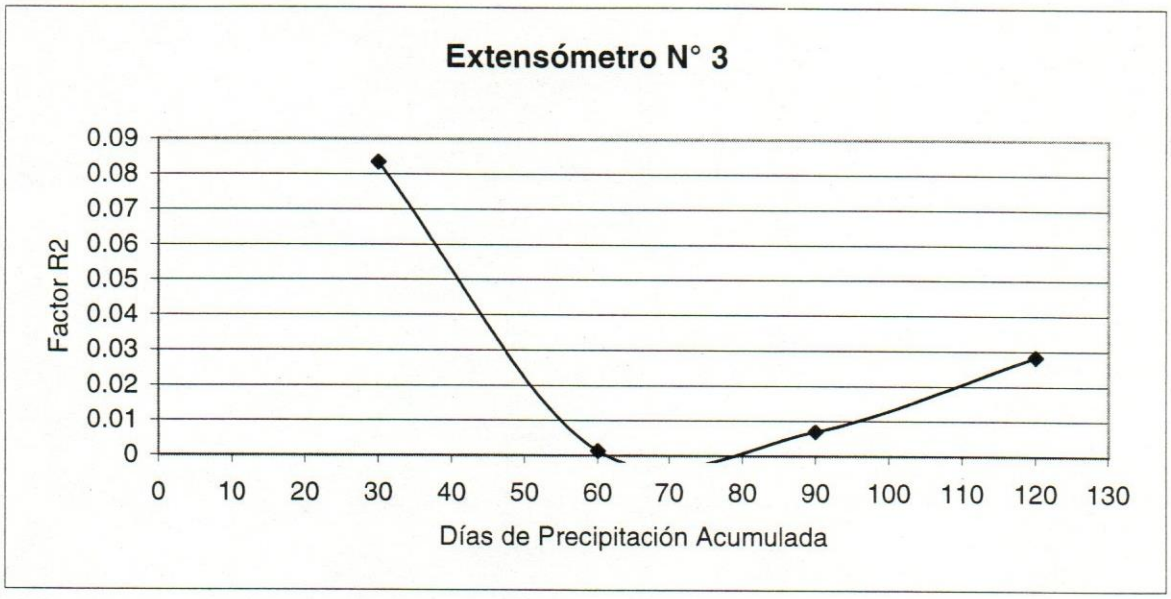
Correlación : V mensual = f (Precp_N)
Período (12/95-01/98)

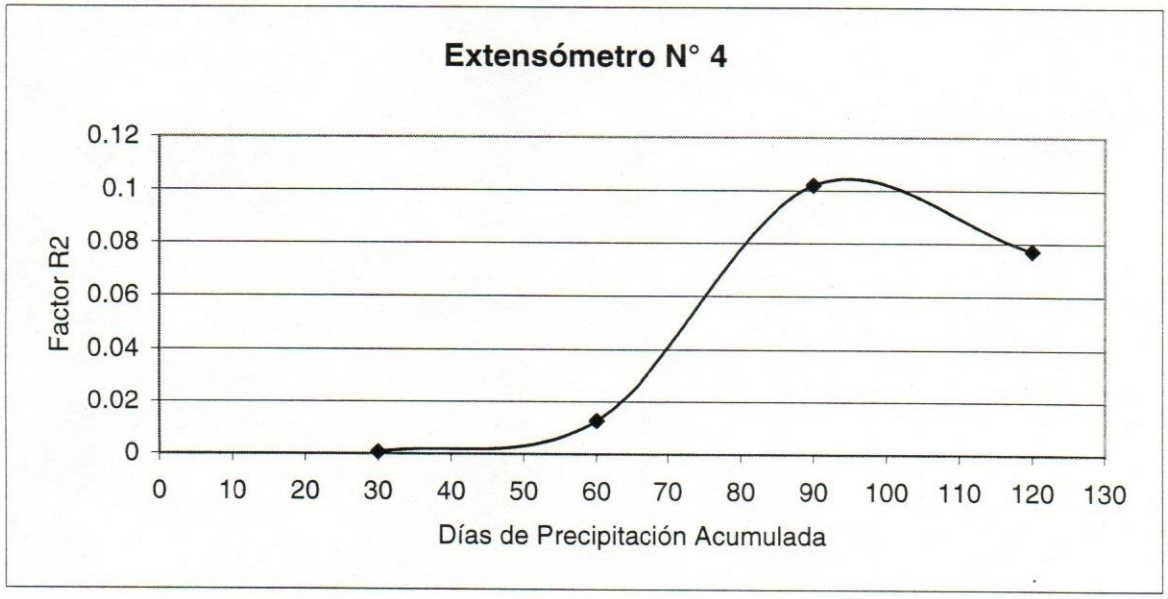




Gráficos N° 5 y 6 Resultados de la correlación lluvia - movimiento superficial

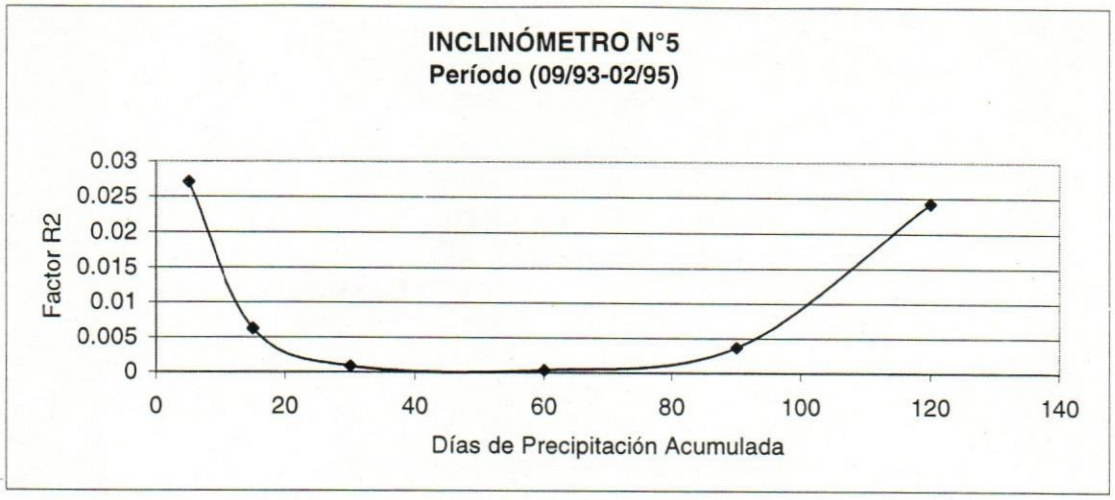
Correlación : V mensual = f (Precp_N)
Período (12/95-01/98)

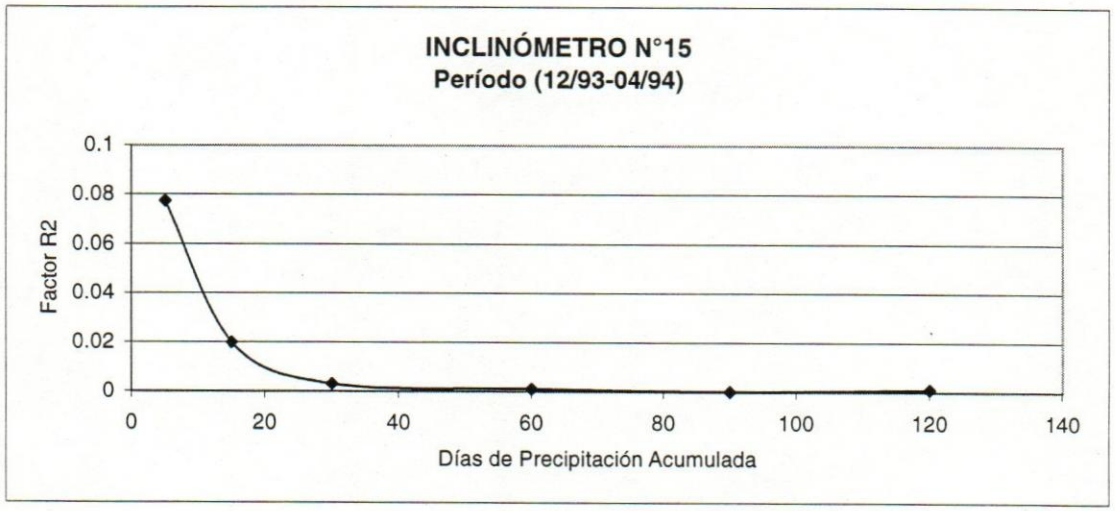


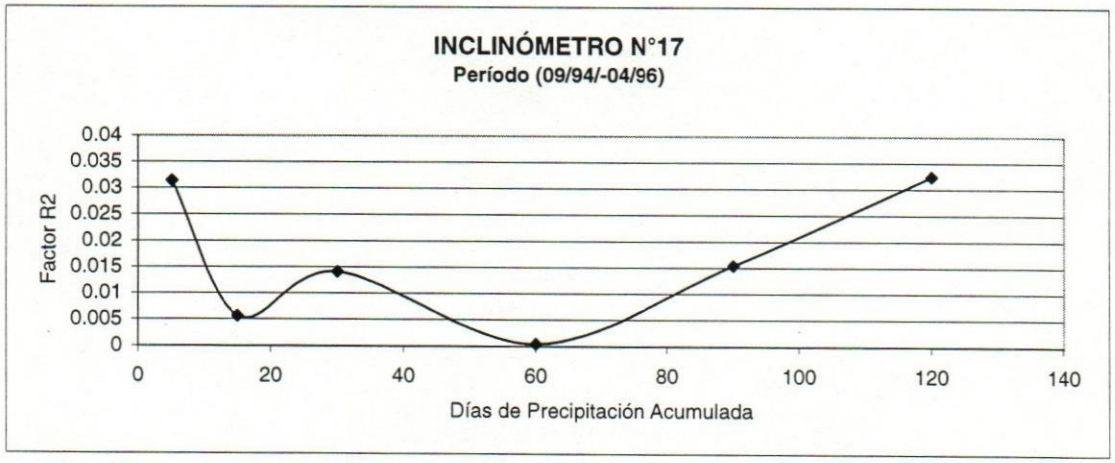


Gráficos N° 7 y 8 Resultados de la correlación lluvia - movimiento superficial

Correlación : Vanual = f (Precp_N)

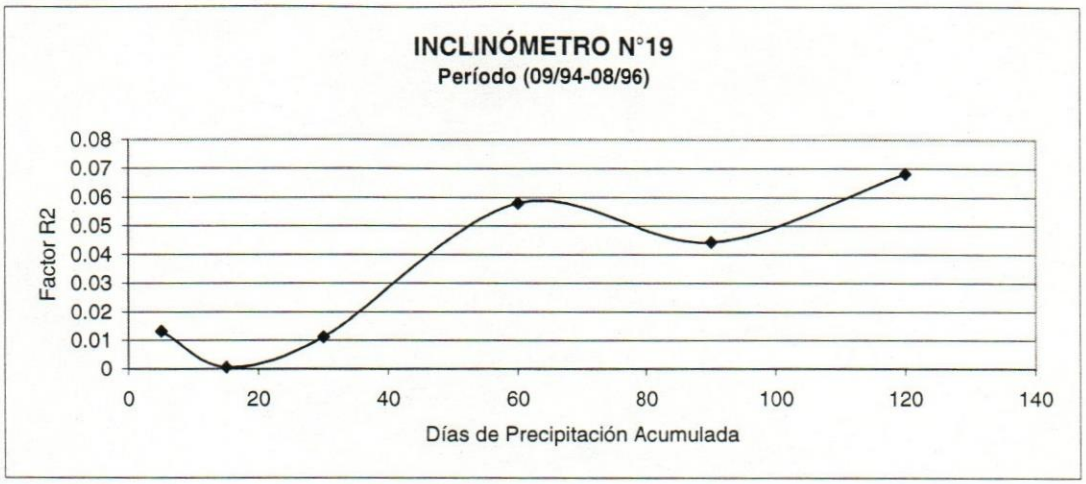


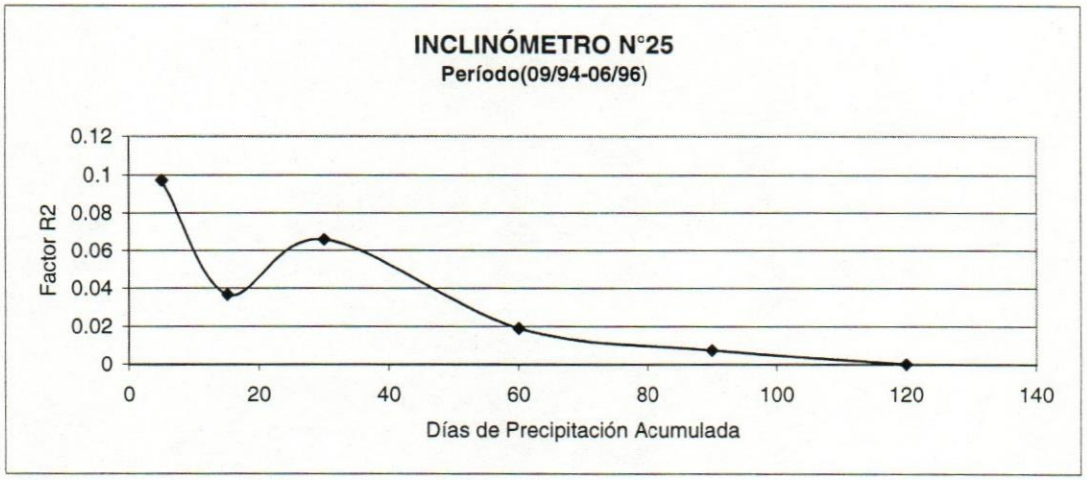


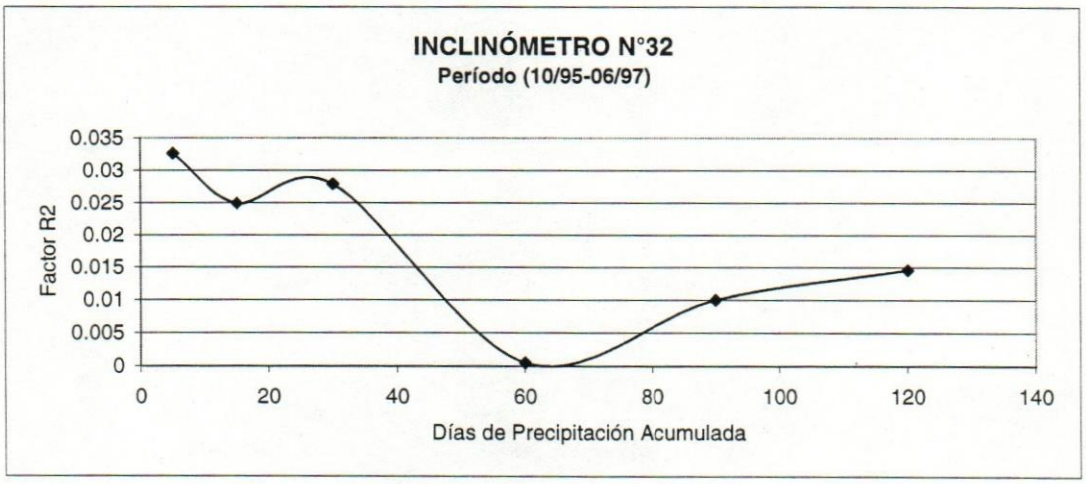


Gráficos N° 9, 10 y 11 Resultados de la correlación lluvia - movimiento profundo

Correlación : Vanual = f (Precp_N)

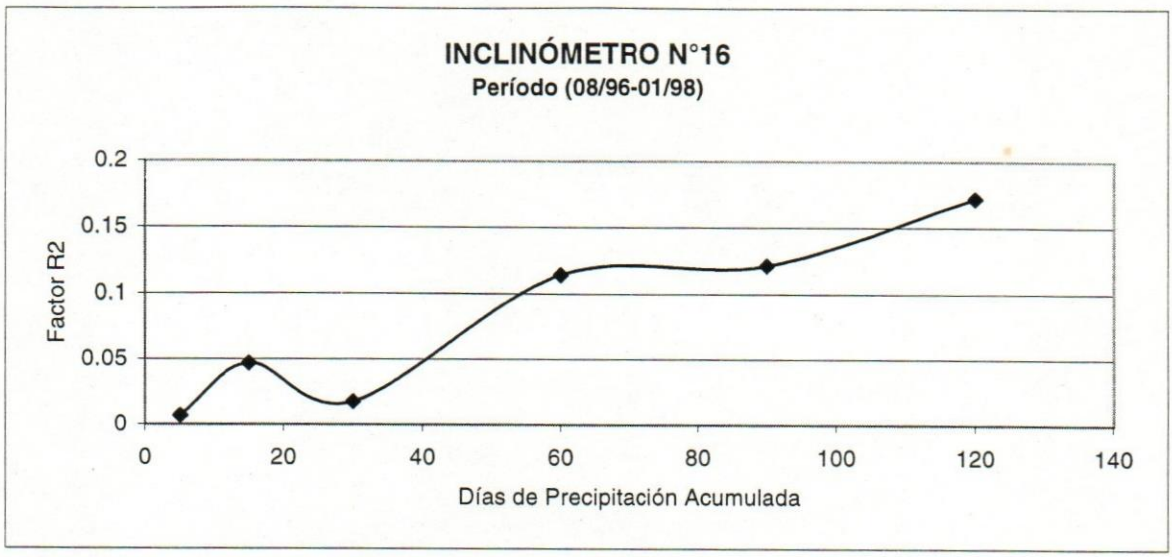


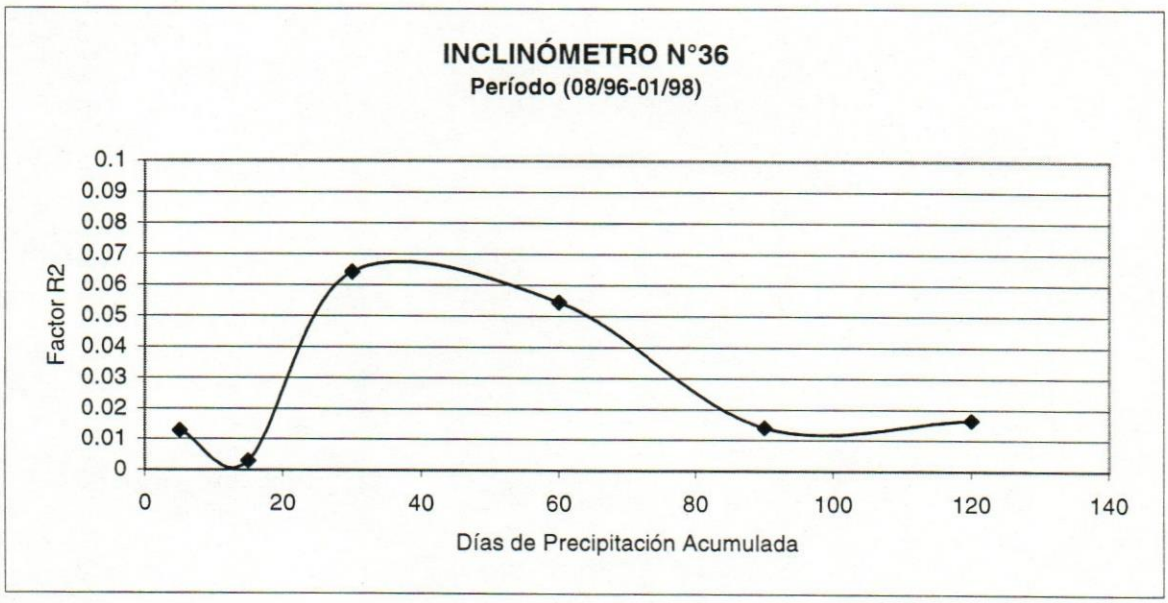




Gráficos N° 12, 13 y 14 Resultados de la correlación lluvia - movimiento profundo

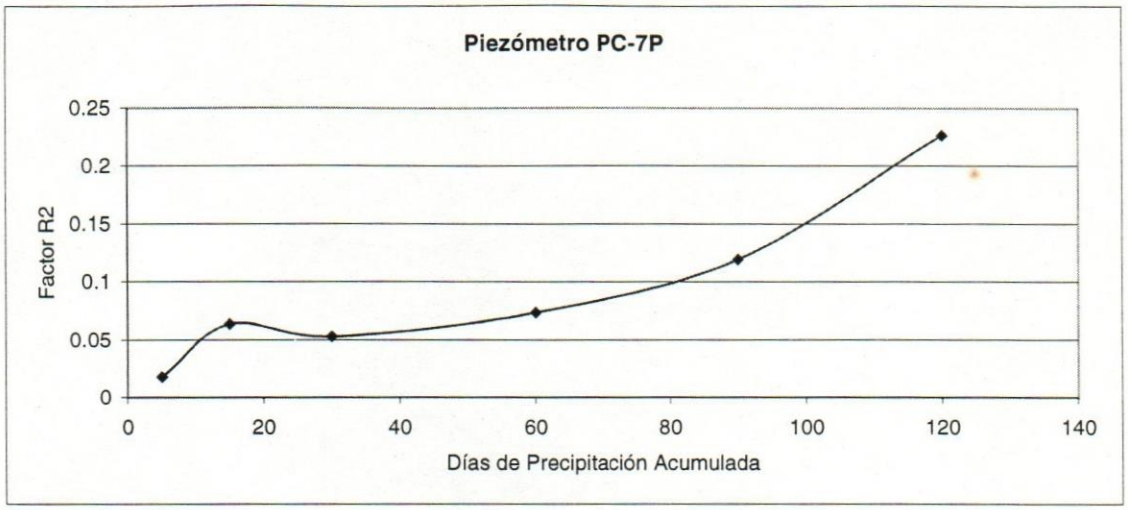
Correlación : Vanual = f (Precp_N)

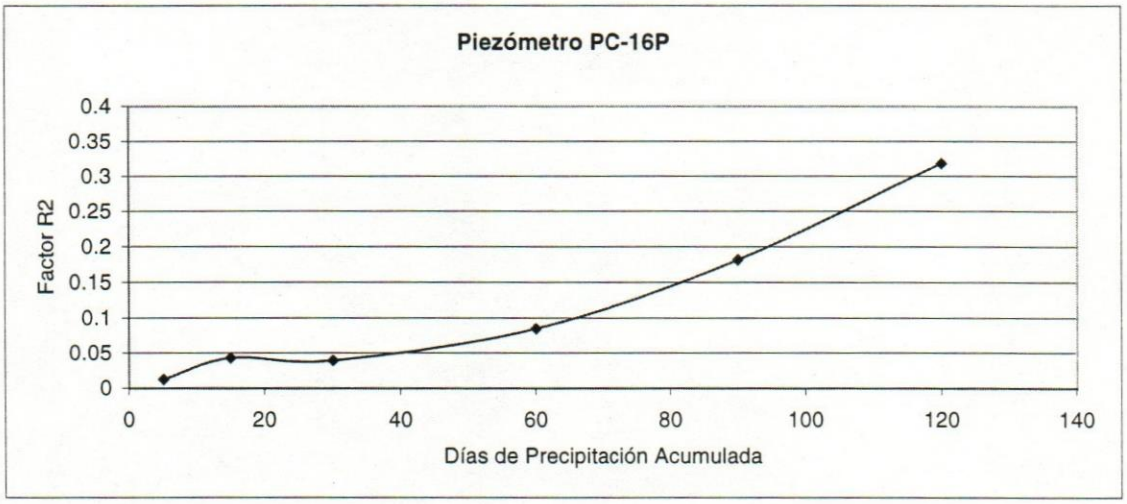


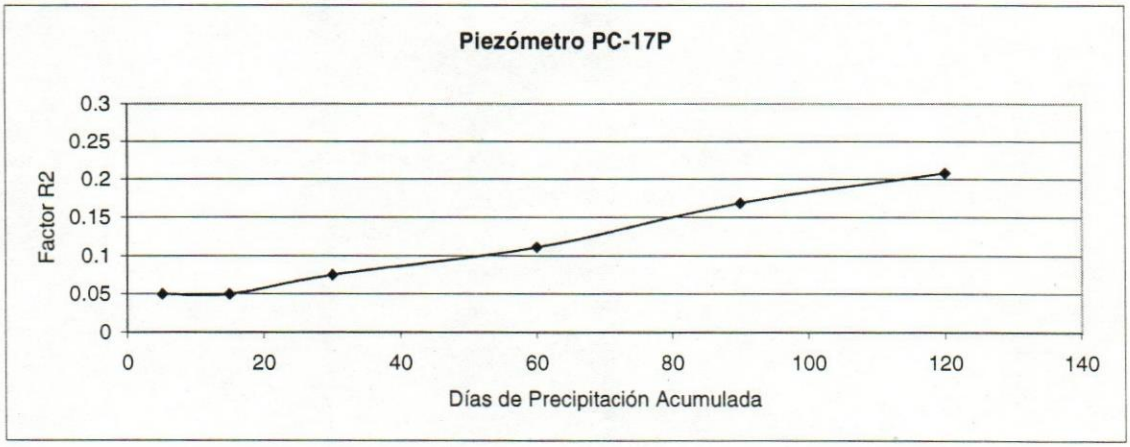


Gráficos N° 15 y 16 Resultados de la correlación lluvia - movimiento profundo

Correlación: Piez = f (Precip_N)
Período (04/94 - 01/98)







Gráficos N° 17, 18 y 19 Resultados de la correlación lluvia - nivel piezométrico

10. Bibliografía

1. ARTHUR D. LITTLE DE VENEZUELA, C.A. "**Programa de Seguridad Geotécnica y Ambiental, Planta Cantinas 1997**", mayo de 1998.

2. ARTHUR D. LITTLE DE VENEZUELA, C.A. "**Evaluación del Comportamiento Geotécnico de la Planta Cantinas**", Segunda Evaluación de 1995, enero de 1996. (figura 2).

3. ARTHUR D. LITTLE DE VENEZUELA, C.A. **"Evaluación del Comportamiento Geotécnico de la Planta Cantinas"**, Primera Evaluación de 1997, marzo de 1997. (pag. 4).

4. ARTHUR D. LITTLE DE VENEZUELA, C.A. **"Evaluación de las Medidas Correctivas para el Deslizamiento de la Planta Cantinas**", agosto de 1997. (pag. 3-13, 21 y 39).

5. ARTHUR D. LITTLE DE VENEZUELA, C.A. **"Inclinómetros y Movimientos Horizontales en Planta Cantinas**", septiembre de 1996. (pag. 3-6).

6. BARATA EMMANUEL **"Landslides in the Tropical Region of Rio de Janeiro",** 1969, Proc. 7th Int. Conf. SMFE, Mexico City, (2), (pag. 507-516).

7. BLUME JOHANNES "**Metodos Estadísticos para Ingenieros"** Primera Edición:1974, (pag. 103,104 y 114).

8. BRAND E. W. **"Some Thoughts on Rain-Induce Slope Failures",** 1981, Proc. 10th Int. Conf. SMFE, Stockholm, (3), (pag. 373-375).

9. BRAND E. W. **"Predicting tht Performance of Residual Soil Slopes",** 1985, Proc. 11th Int. Conf. SMFE, San Francisco, (5), (pag. 2541-2578).

10. COSTA NUNEZ A. J., COUTO FONSECA A. M., FERNÁNDEZ C. E., CRAIZER W. **"Intense Rainstorms and Ground Slides",** 1985, Proc. 11th Int. Conf. SMFE, San Francisco, (4), (pag. 1627-1629).

11. DE SANTIS FELICIANO **"Informe Avance Sobre las Mediciones Realizadas por el Sistema Vigilog, Periodo Mayo de 1997 a Enero de 1998",** marzo1998, (pag. 4 y 9-11).

12. INGEOTEC " **Inclinómetro, Principios de Instalación, Medición y Evaluación",** marzo 1996, (pag. 2, y 4-8).

13. POUGET P."**Exploitation des Donnes de Suivi. Site de la Clapiere – Correlations entre Differents Parametres Climatologiques et de Desplacements",** junio 1994, (pag. 17-22).

14. SLOPE INDICATOR COMPANY "**Aplications Guide ",** 1994, (Capitulo 3).

15. VARGAS M. **"Slope Stability in Residual Soils",** 1971, Proc. 4th Panam. Conf. SMFE, San Juan, Puerto Rico, (1), (pag. 135-143).

16. WOLLE C, HACHICH W. "**Rain-Induced Landslides in Southeastern Brazil"**, 1989, Proc. 12th Int. Conf. SMFE, Rio de Janeiro, (3), (pag. 1639-1642).

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

" ANEXOS "

" INVESTIGACION DE LAS CORRELACIONES ENTRE PRECIPITACION, NIVELES PIEZOMETRICOS Y DESPLAZAMIENTOS PROFUNDOS Y SUPERFICIALES DE UN DESLIZAMIENTO "

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: .....

JURADO EXAMINADOR

Firma:	**Firma:**	**Firma:**
Nombre: Ing.Cira Hernández	**Nombre:** Ing.Hugo Perez	**Nombre:** Ing.Roque Garcia

REALIZADO POR	Bachiller Anna Lorena Ferri M.
PROFESOR GUIA	Ing. Cira Hernández
FECHA	29 de Mayo de 1998

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL I

ANEXO A – METODOLOGÍA DE TRABAJO 1

ANEXO B – GRÁFICAS "PRECIPITACIÓN ACUMULADA VS. VELOCIDAD" 2

1. CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN – MOVIMIENTO SUPERFICIAL 2
   - *1.1 Velocidad Diaria* 2
   - *1.2 Velocidad Mensual* 30
2. CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN – MOVIMIENTO PROFUNDO 48

ANEXO C – GRÁFICAS "PRECIPITACIÓN ACUMULADA VS. NIVEL PIEZOMÉTRICO" 98

1. CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN – NIVEL PIEZOMÉTRICO 98

Anexo A – Metodología de Trabajo

El factor de correlación R^2 nos da una idea de la dependencia existente entre dos valores y viene dado por las siguientes ecuaciones:

Sea (x_v, y_v) ; v = 1, 2, 3....N una muestra aleatoria

y

$$\bar{x} = \sum_{v=1}^{N} x_v \qquad \bar{y} = \sum_{v=1}^{N} y_v$$

Entonces,

$$R^2 = \frac{S^2_{\bar{xy}}}{S_{\bar{xx}} S_{\bar{yy}}}$$

Donde,

$$S_{\bar{xx}} = \sum_{v=1}^{N} \left(x_v - \bar{x}\right)^2$$

y

$$S_{\bar{xy}} = \sum_{v=1}^{N} \left(x_v - \bar{x}\right)\left(y_v - \bar{y}\right)$$

Anexo B – Gráficas "Precipitación Acumulada vs. Velocidad"

1. Correlación Precipitación – Movimiento Superficial

1.1 Velocidad Diaria

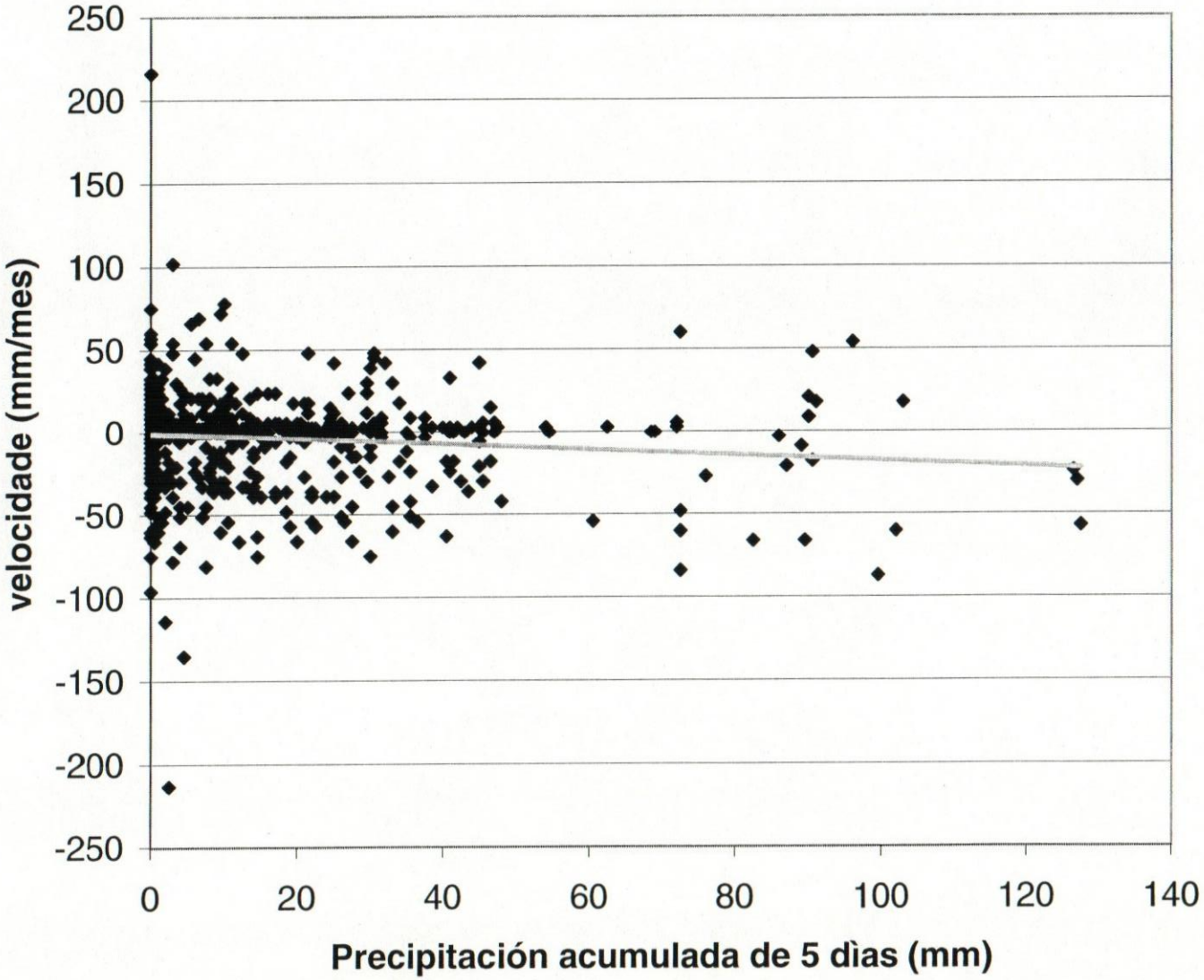
Extensómetro N°1	
Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0153
10	0.0154
15	0.0173
30	0.0149
60	0.0141
90	0.0099
120	0.0045

Extensómetro N°2	
Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0015
10	0.0008
15	0.0004
30	0.0008
60	0.0001
90	0.00005
120	0.0007

Extensómetro N°3	
Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0002
10	0.0041
15	0.0012
30	0.0011
60	0.0017
90	0.0004
120	0.0002

Extensómetro N°4	
Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0013
10	0.0005
15	0.00007
30	0.00007
60	0.0004
90	0.0002

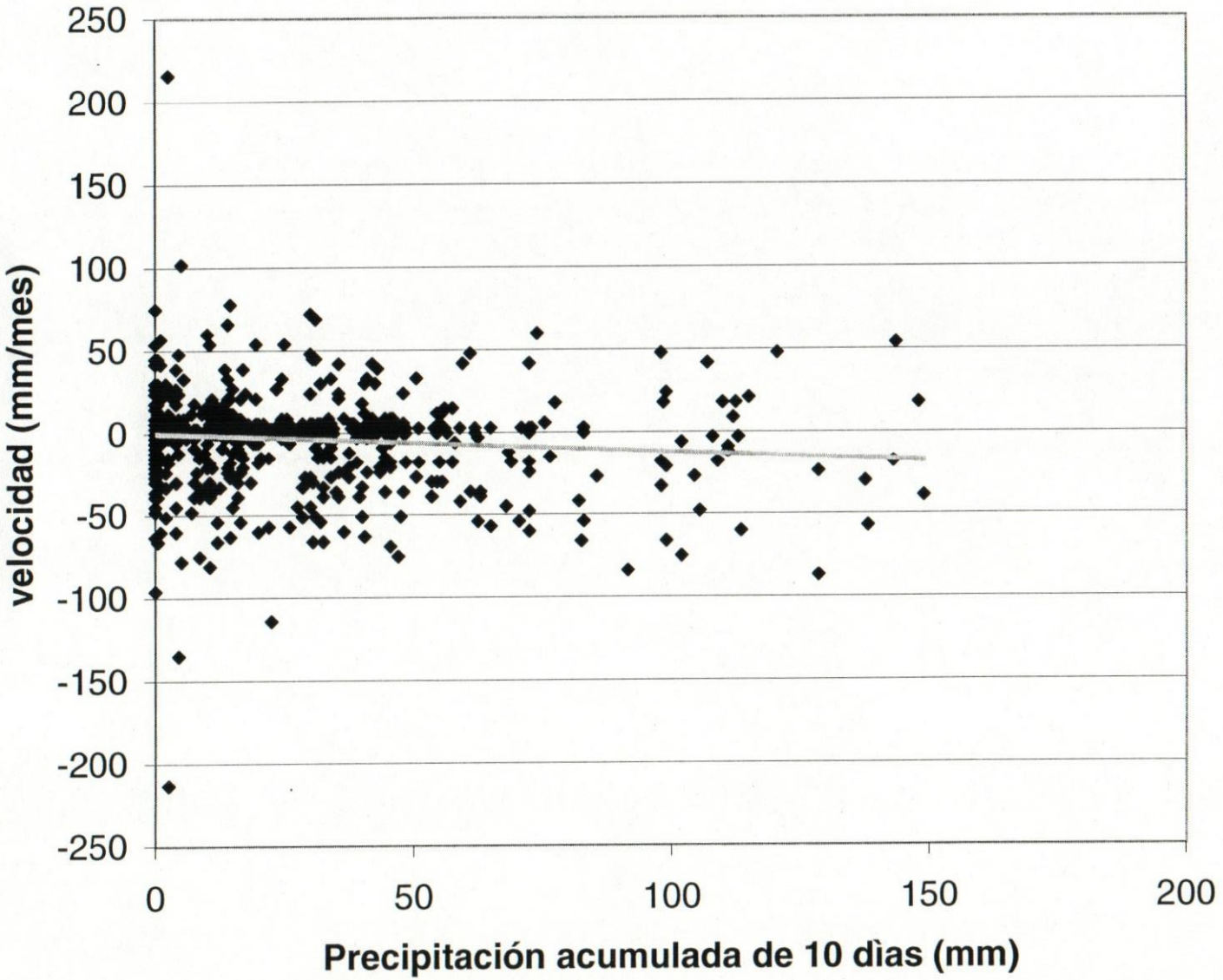
Extensómetro N°1



$y = -0.1711x - 0.6837$

$R^2 = 0.0153$

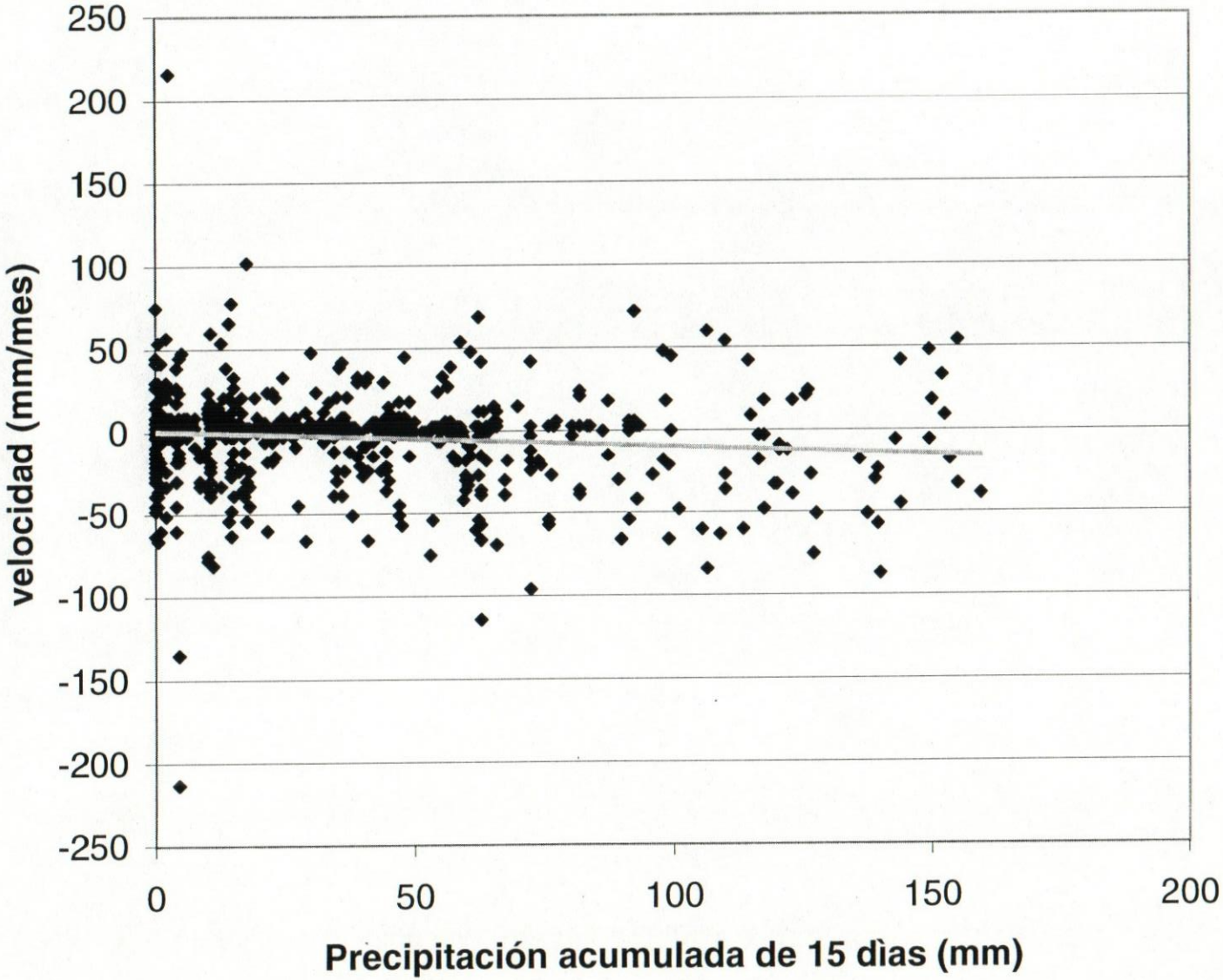
ExtensómetroN°1



$y = -0.1201x - 0.0559$

$R^2 = 0.0154$

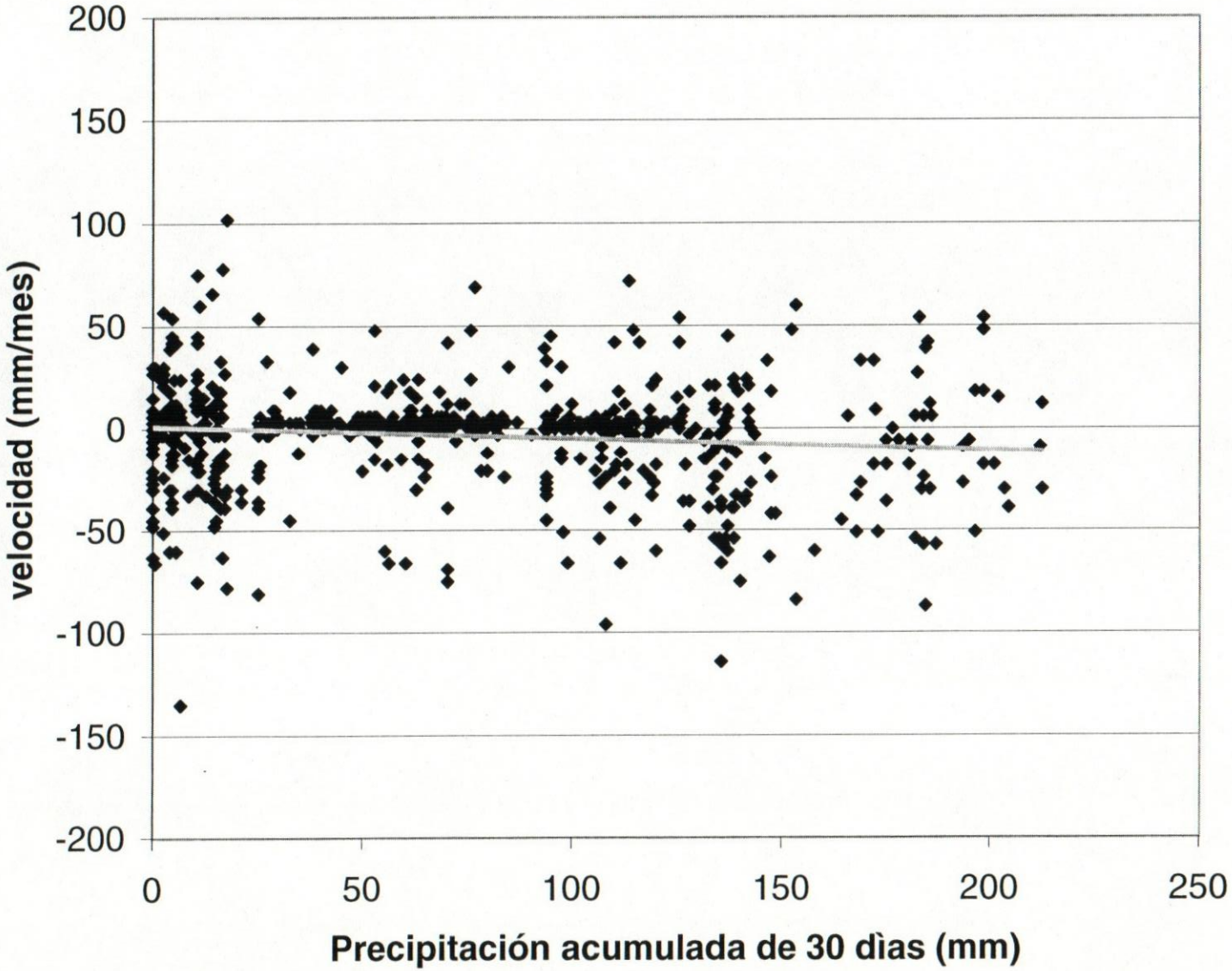
Extensómetro N°1



$y = -0.1012x + 0.5783$

$R^2 = 0.0173$

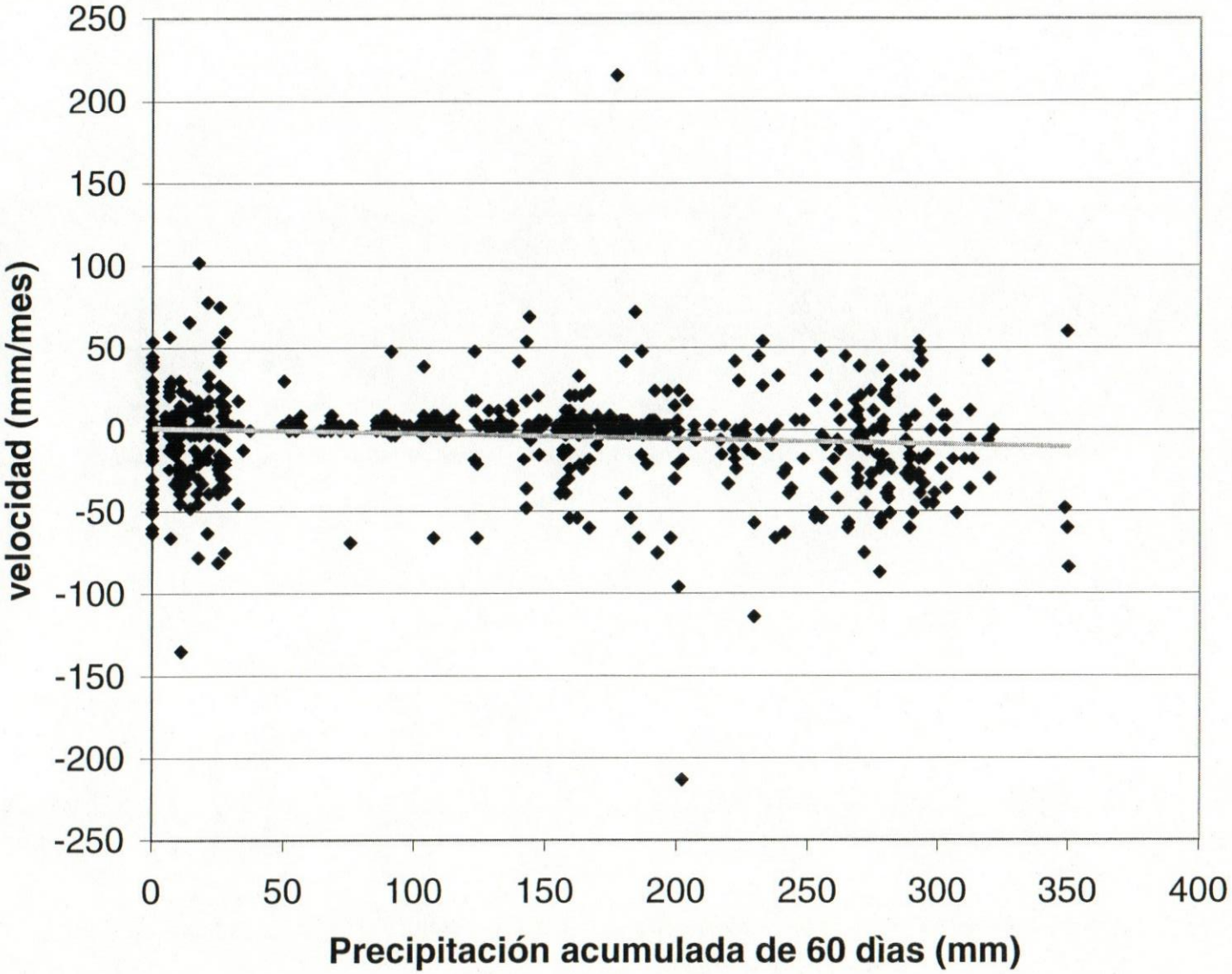
Extensómetro N°1



$y = -0.0592x + 1.0265$

$R^2 = 0.0149$

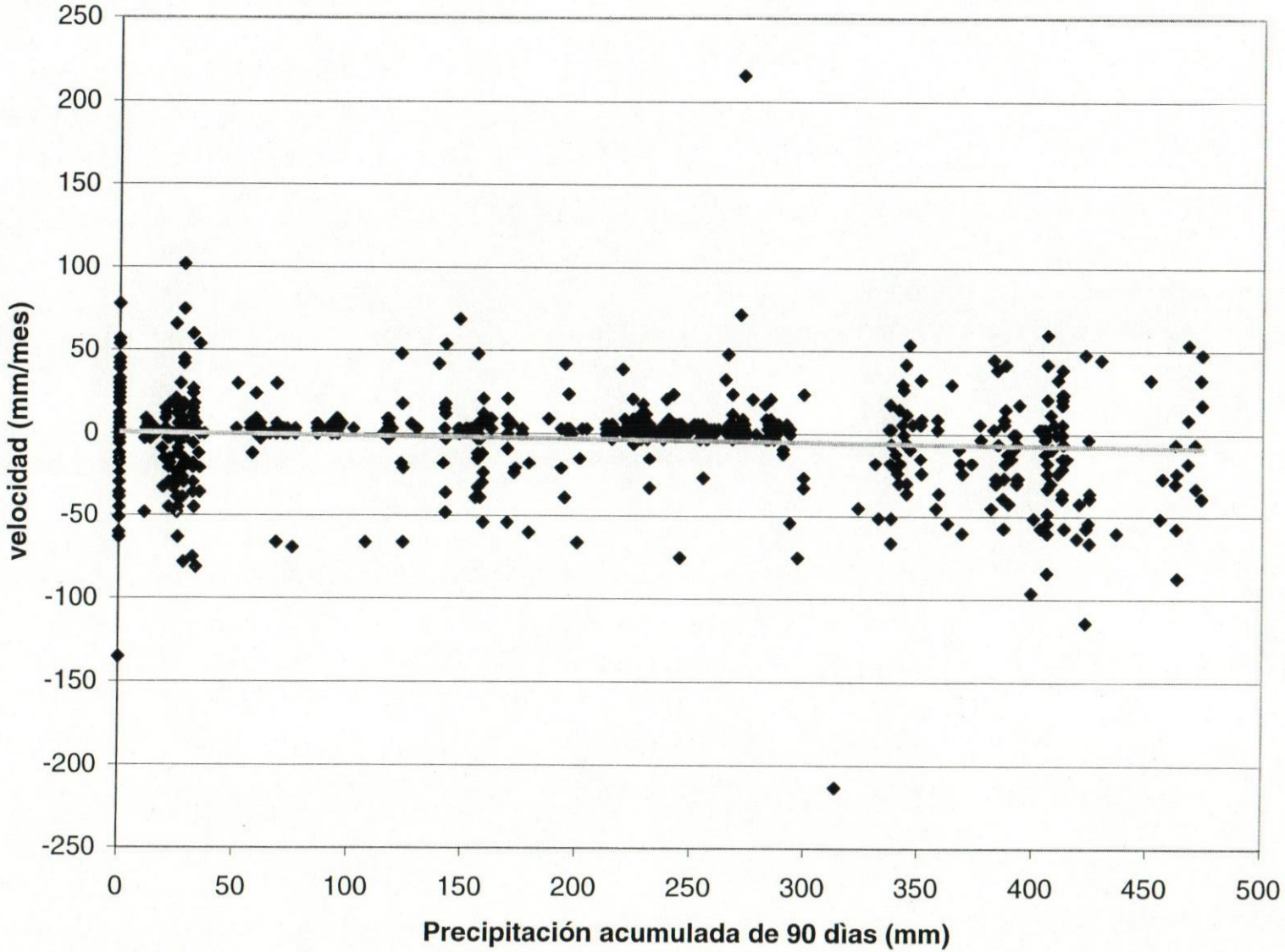
Extensómetro N°1



$y = -0.0327x + 1.2969$

$R^2 = 0.0141$

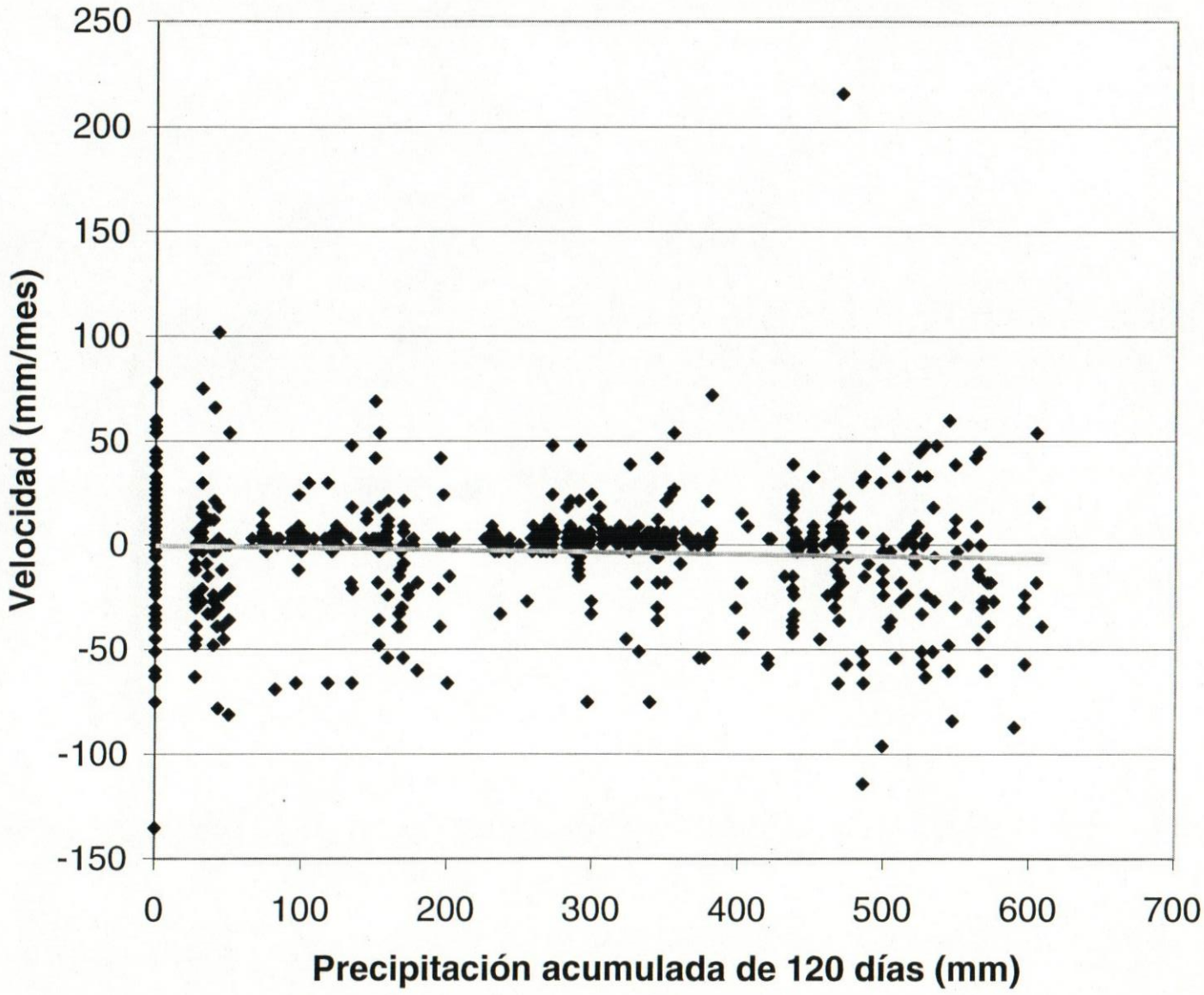
Extensómetro N°1



$y = -0.0192x + 0.6933$

$R^2 = 0.0099$

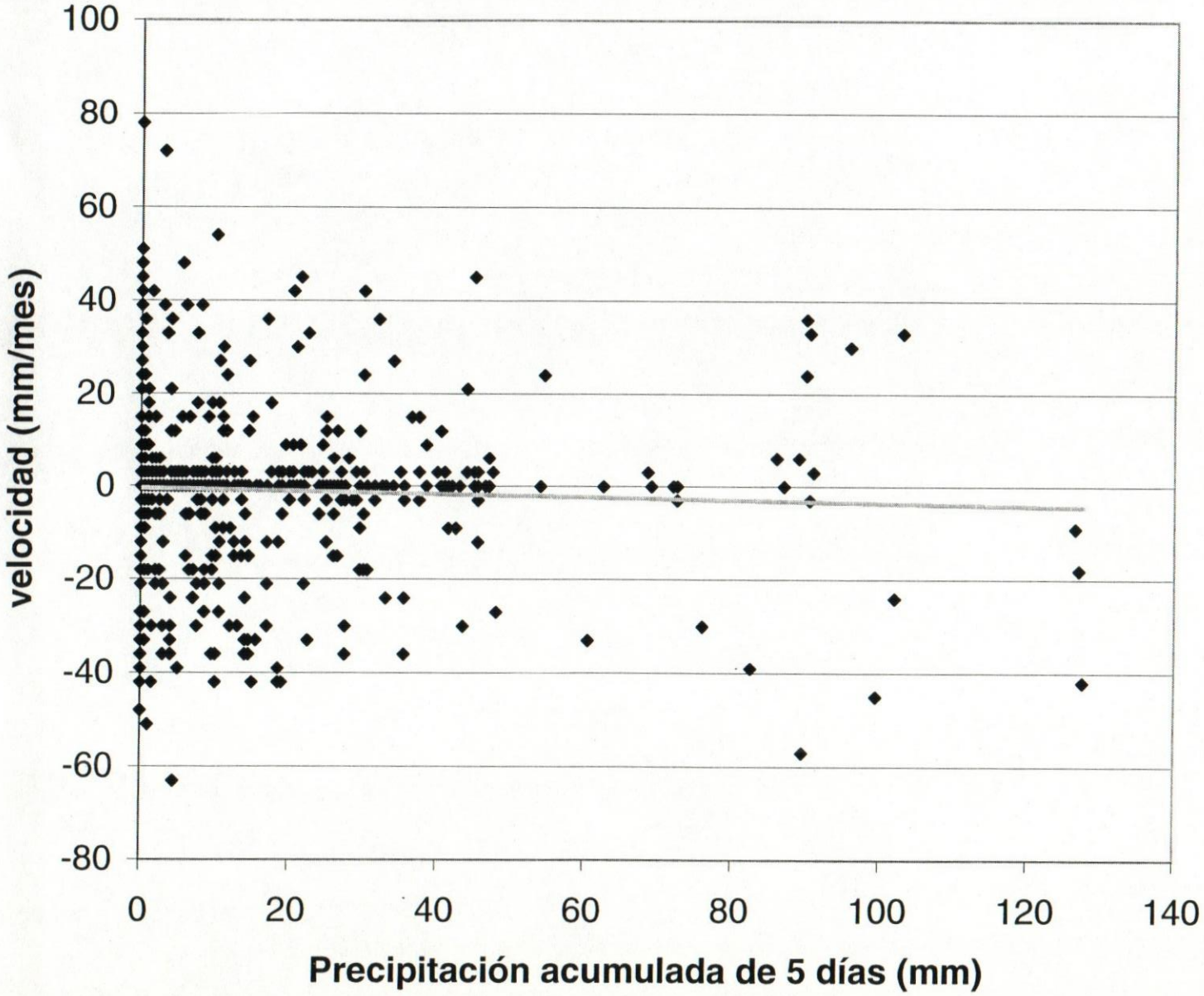
Extensómetro N°1



$y = -0.0101x - 0.4542$

$R^2 = 0.0045$

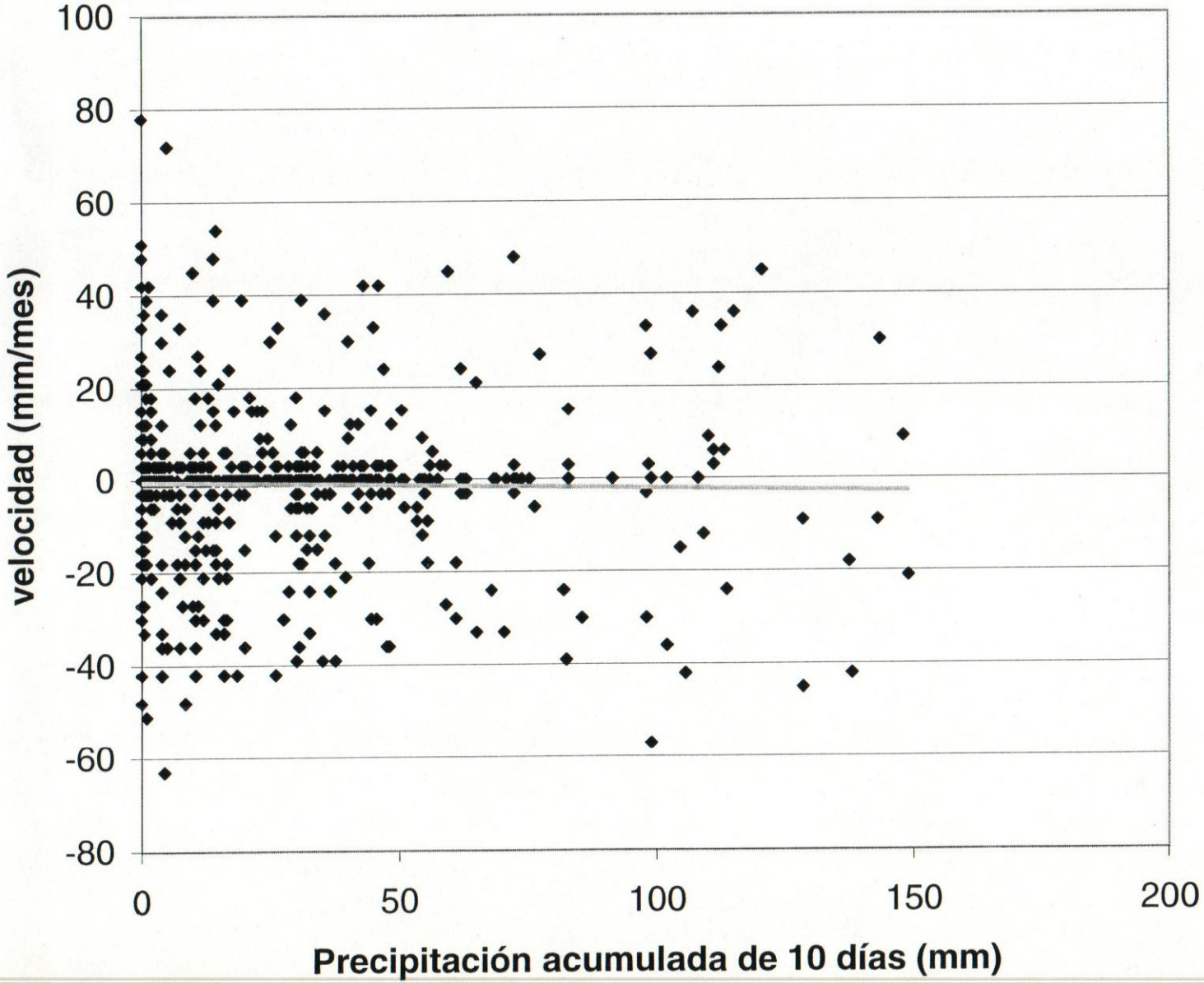
Extensómetro N°2



$y = -0.0309x - 0.4601$

$R^2 = 0.0015$

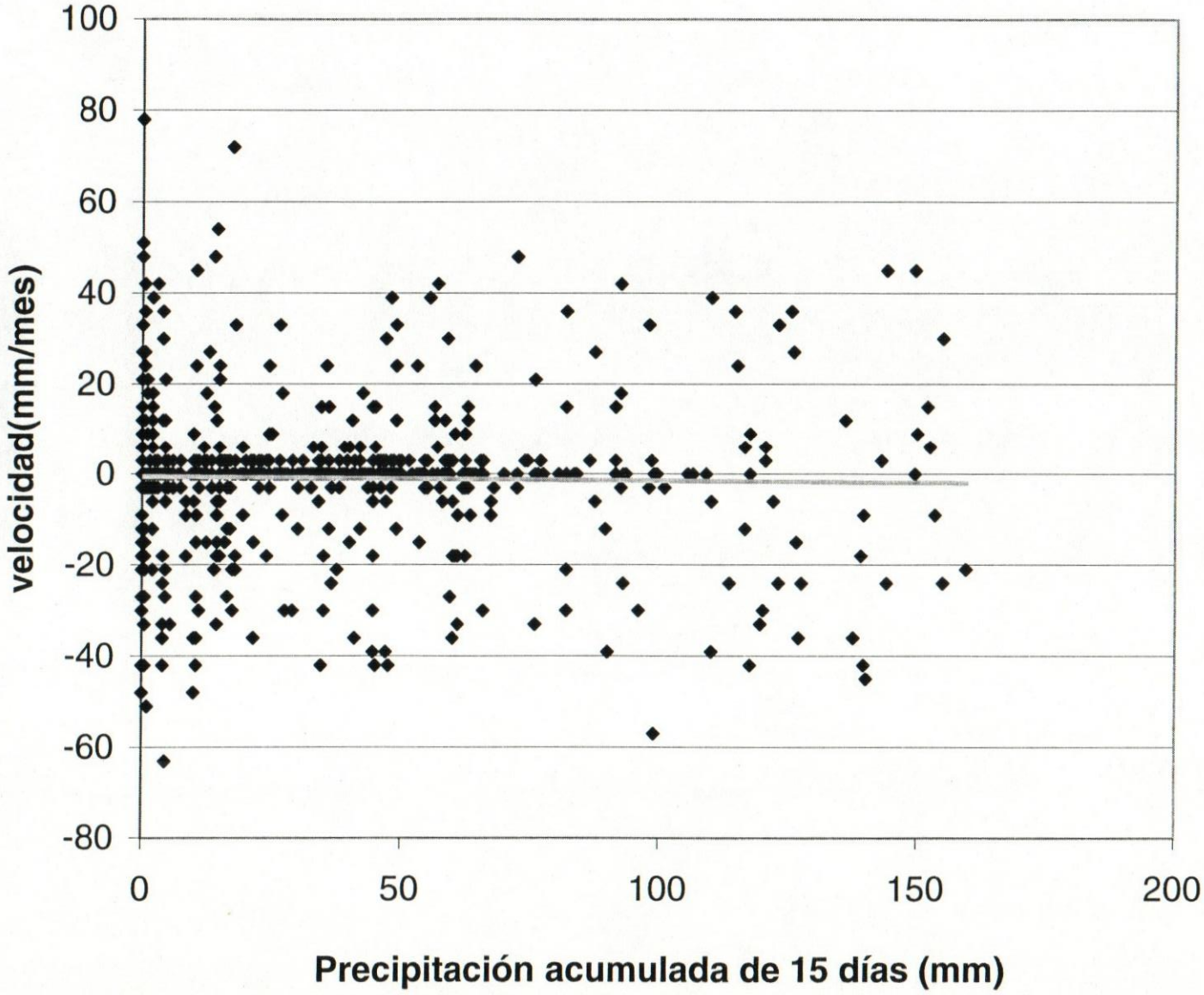
Extensómetro N° 2



$y = -0.0154x - 0.4943$

$R^2 = 0.0008$

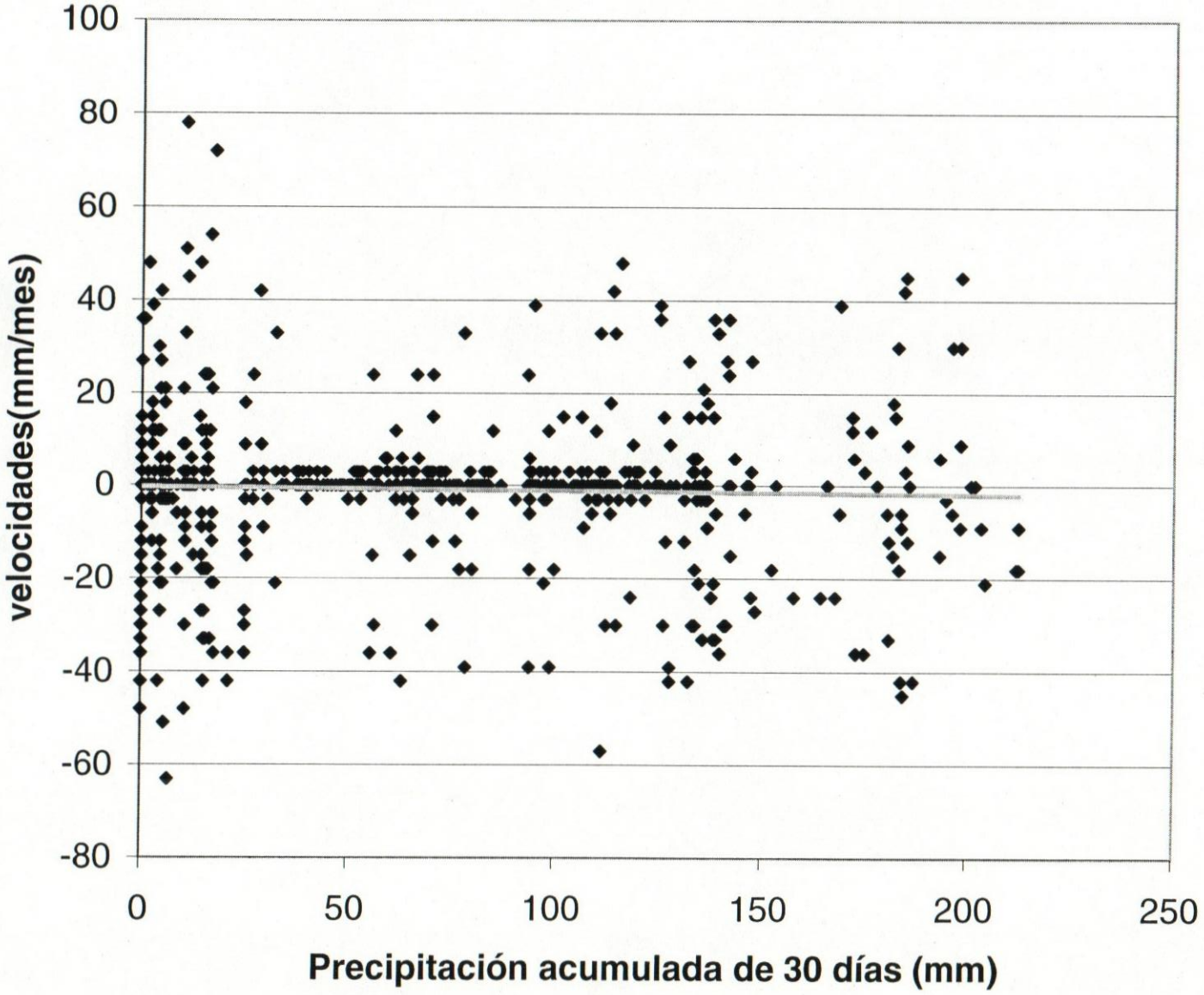
Extensómetro N° 2



$y = -0.0089x - 0.5529$

$R^2 = 0.0004$

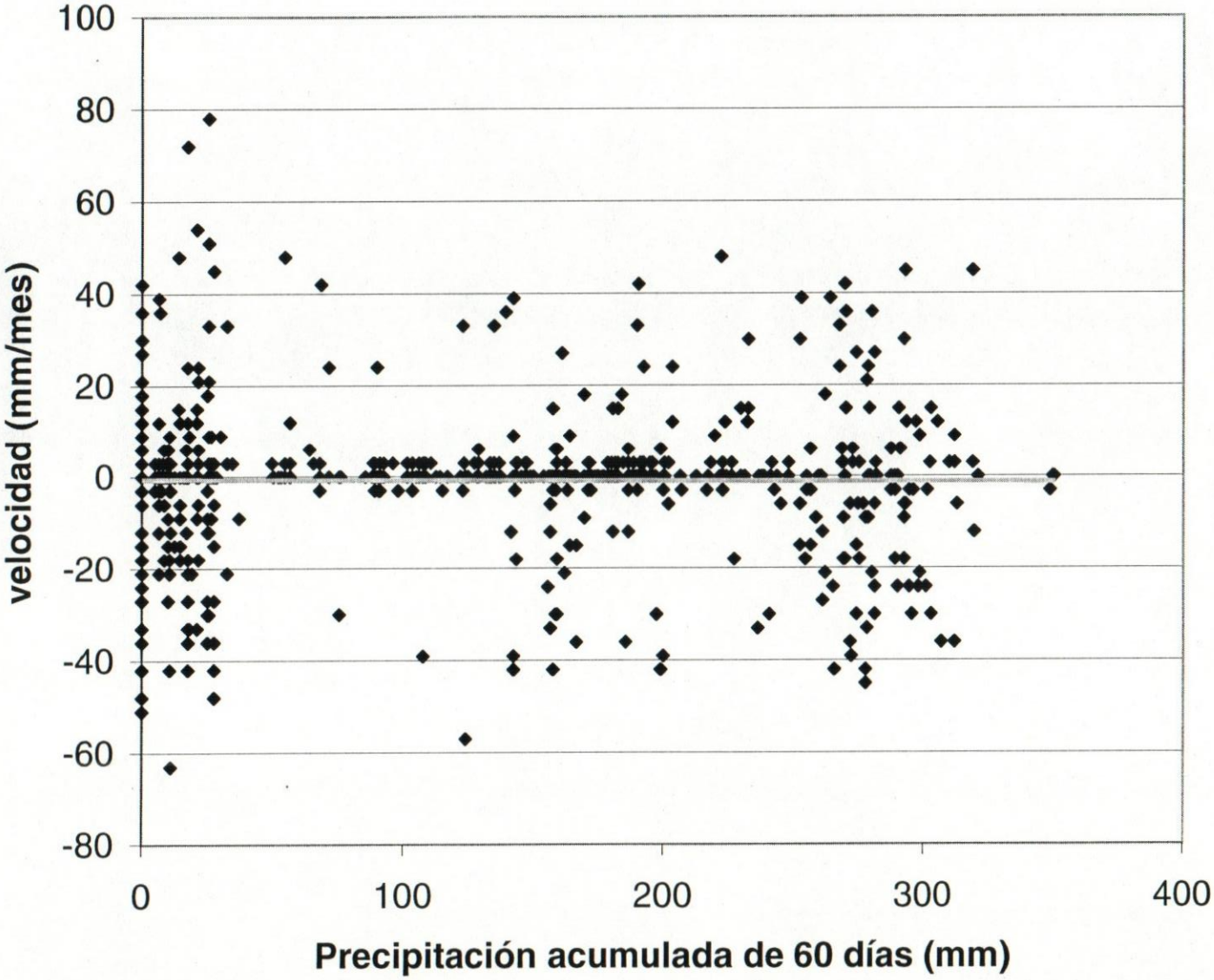
Extensómetro N° 2



$y = -0.0078x - 0.3414$

$R^2 = 0.0008$

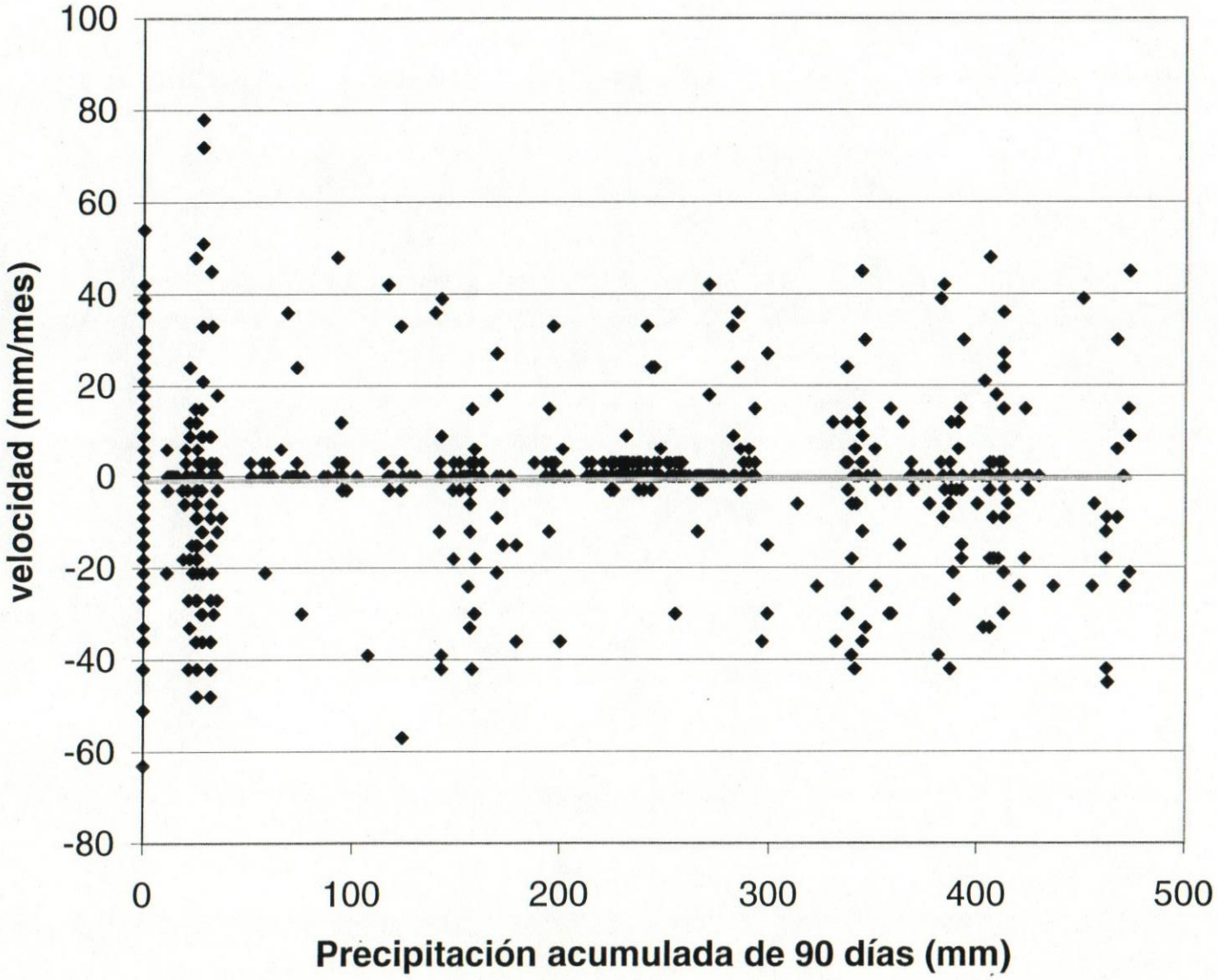
Extensómetro N° 2



$y = -0.0017x - 0.642$

$R^2 = 0.0001$

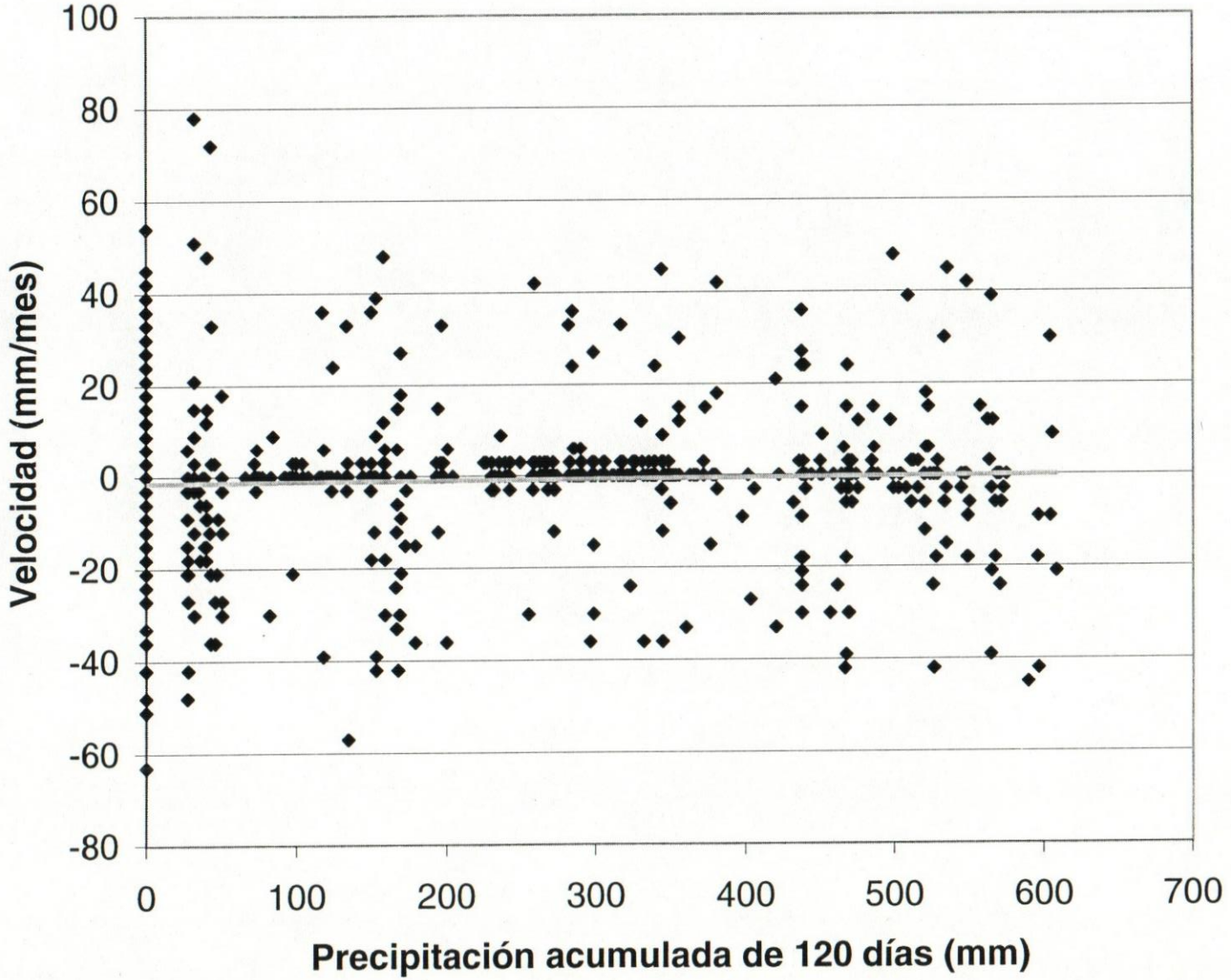
Extensómetro N° 2



$y = 0.0009x - 1.0219$

$R^2 = 6E\text{-}05$

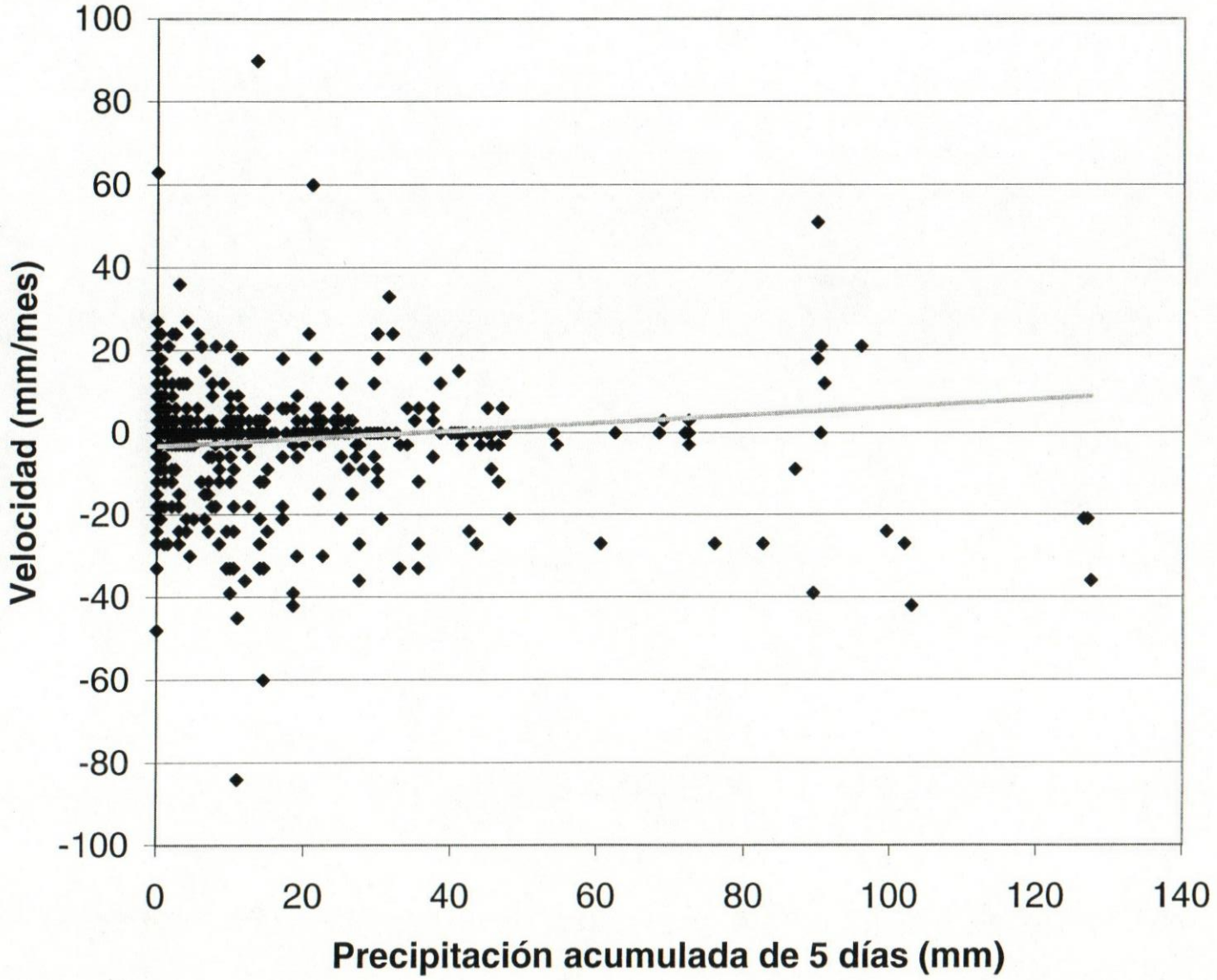
Extensómetro N° 2



$y = 0.0023x - 1.4065$

$R^2 = 0.0007$

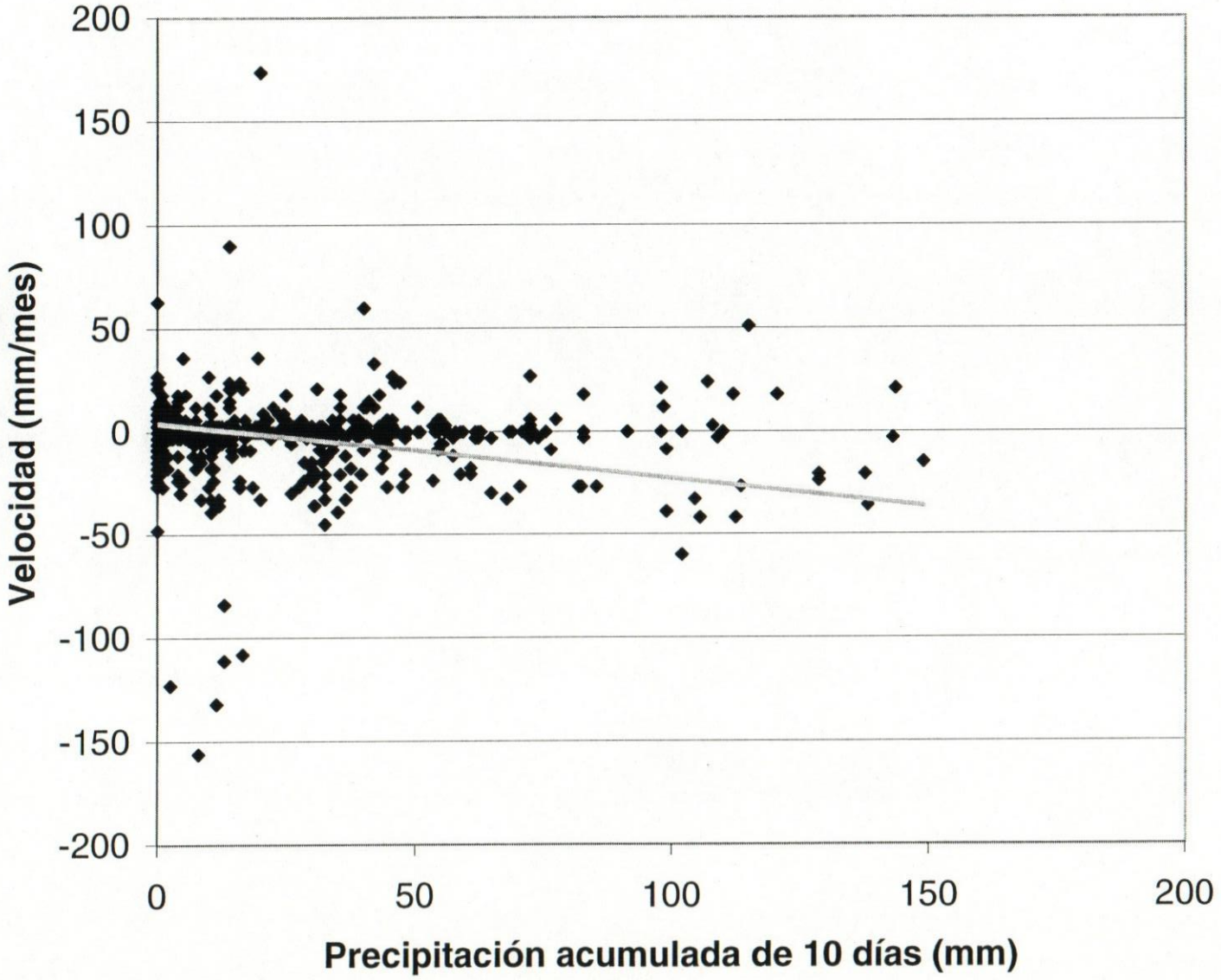
Extensómetro N° 3



$y = 0.0955x - 3.3227$

$R^2 = 0.0002$

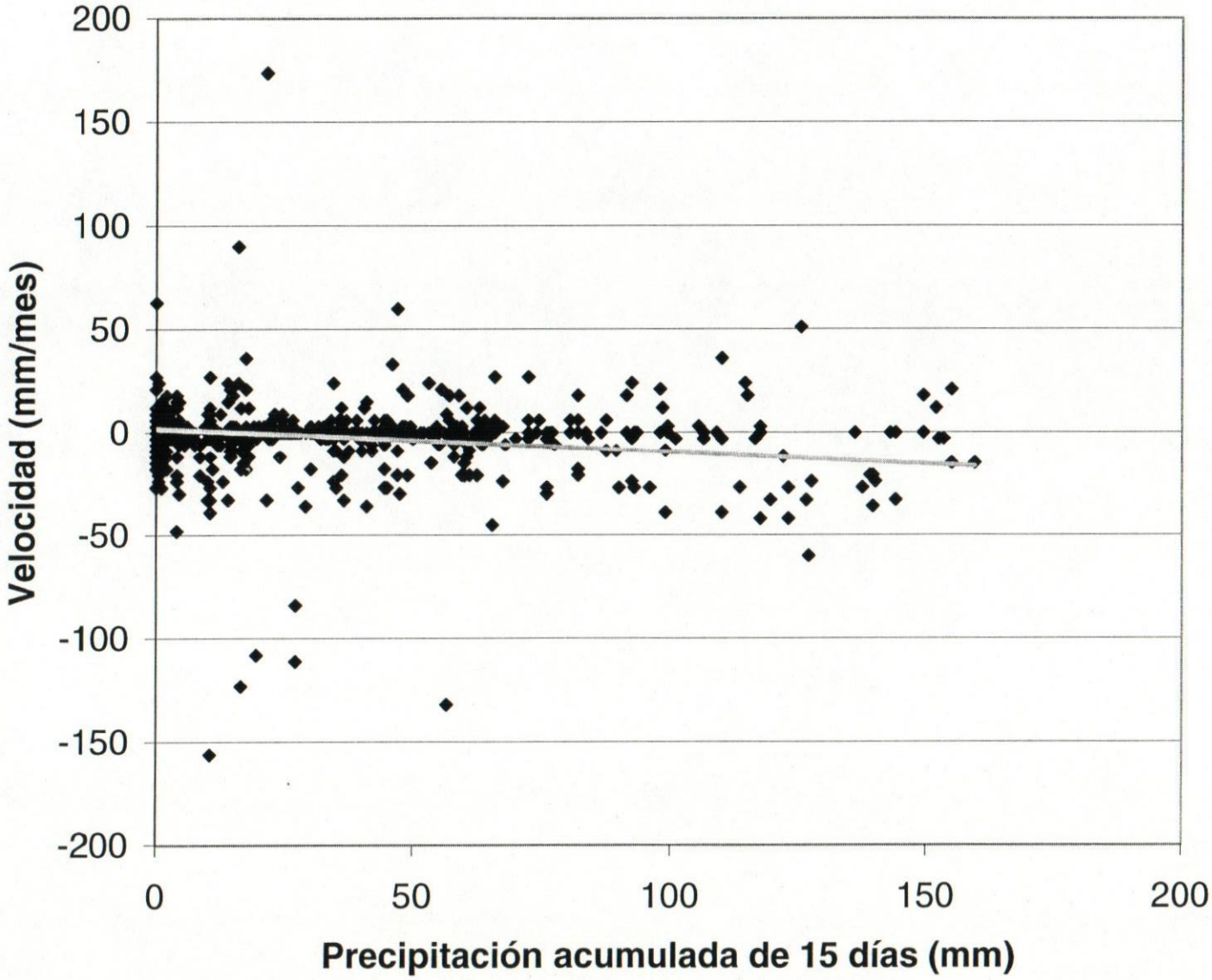
Extensómetro N° 3



$y = -0.2737x + 4.3288$

$R^2 = 0.0041$

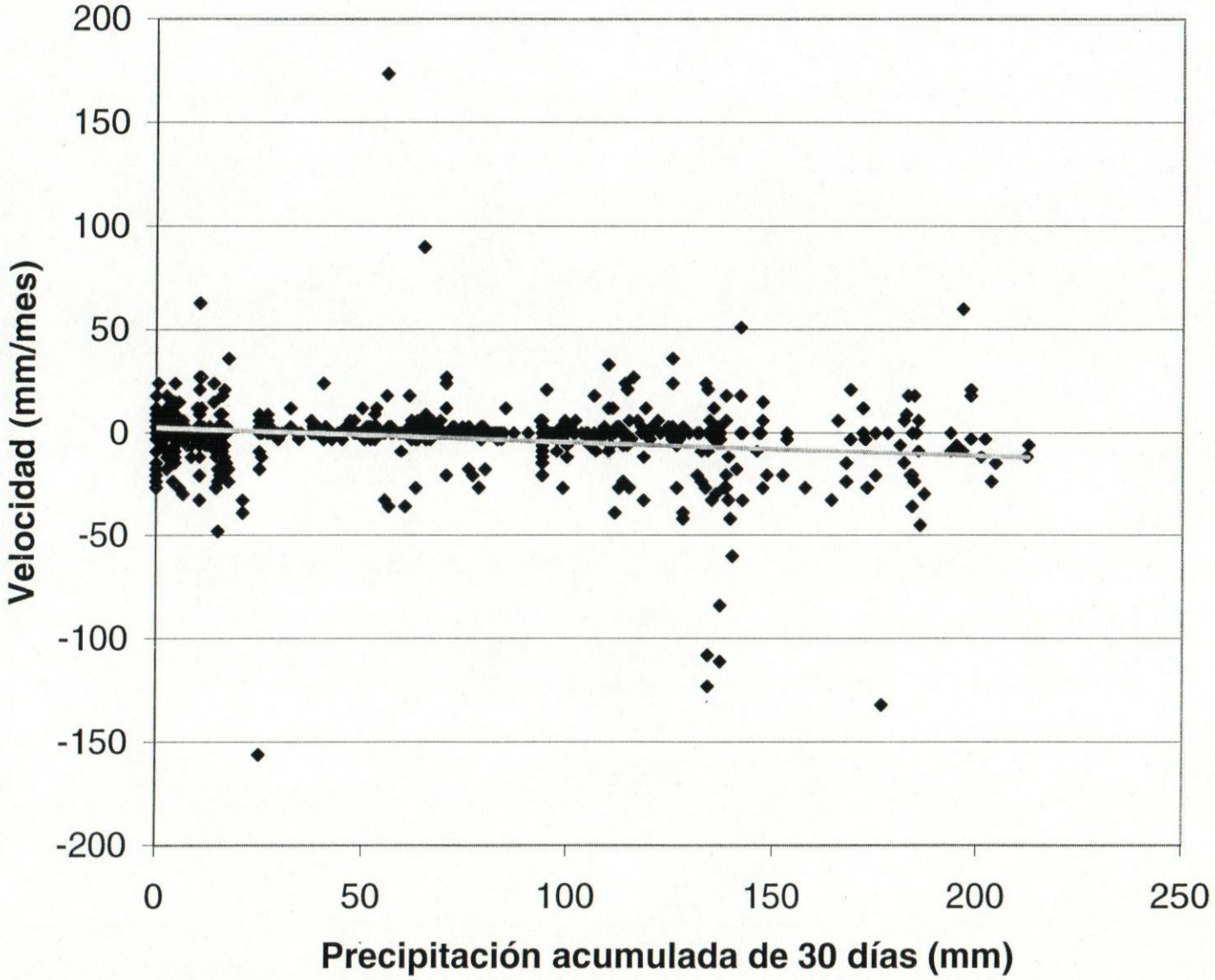
Extensómetro N° 3



$y = -0.1162x + 1.8661$

$R^2 = 0.0012$

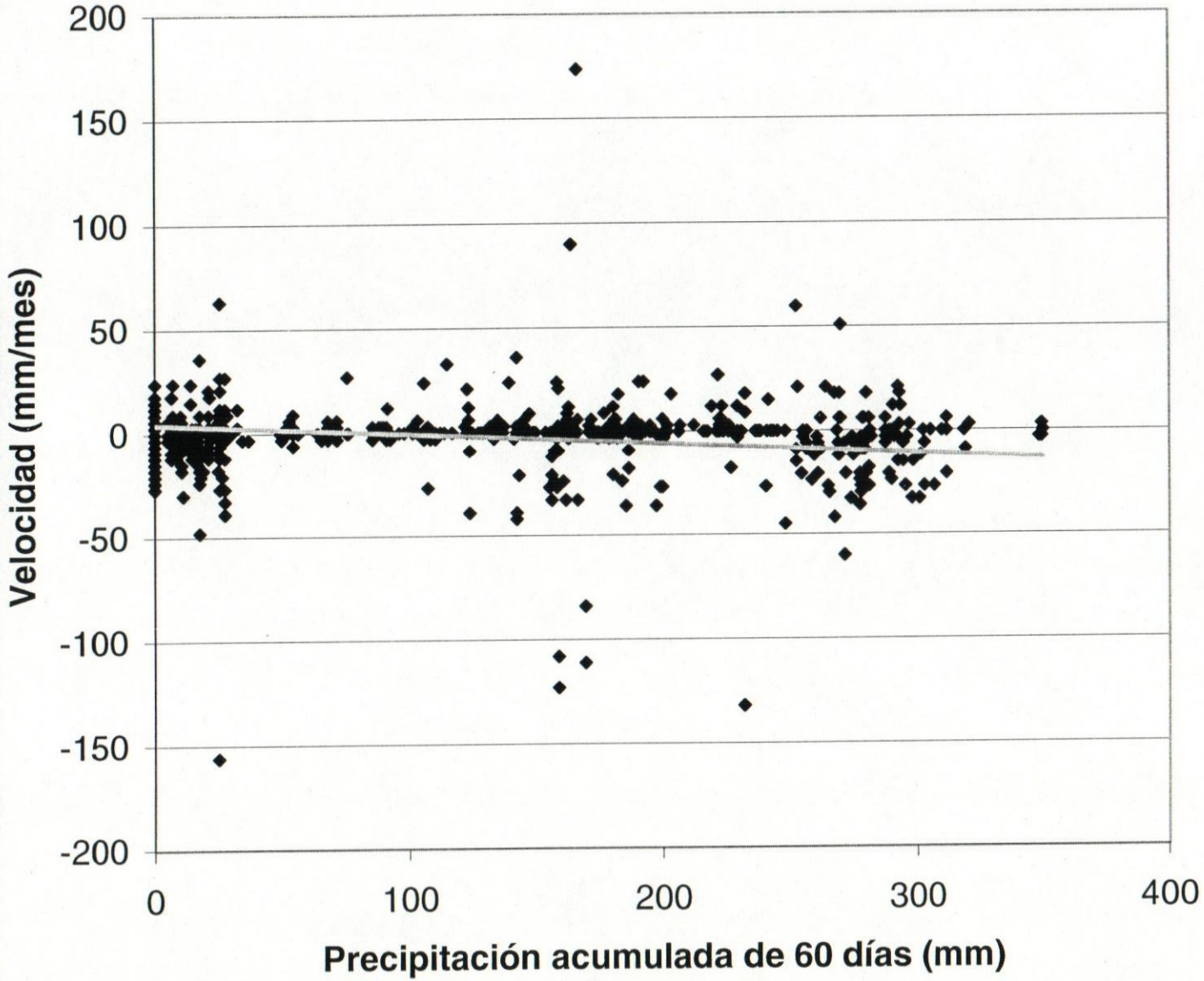
Extensómetro N° 3



$y = -0.0699x + 2.5154$

$R^2 = 0.0011$

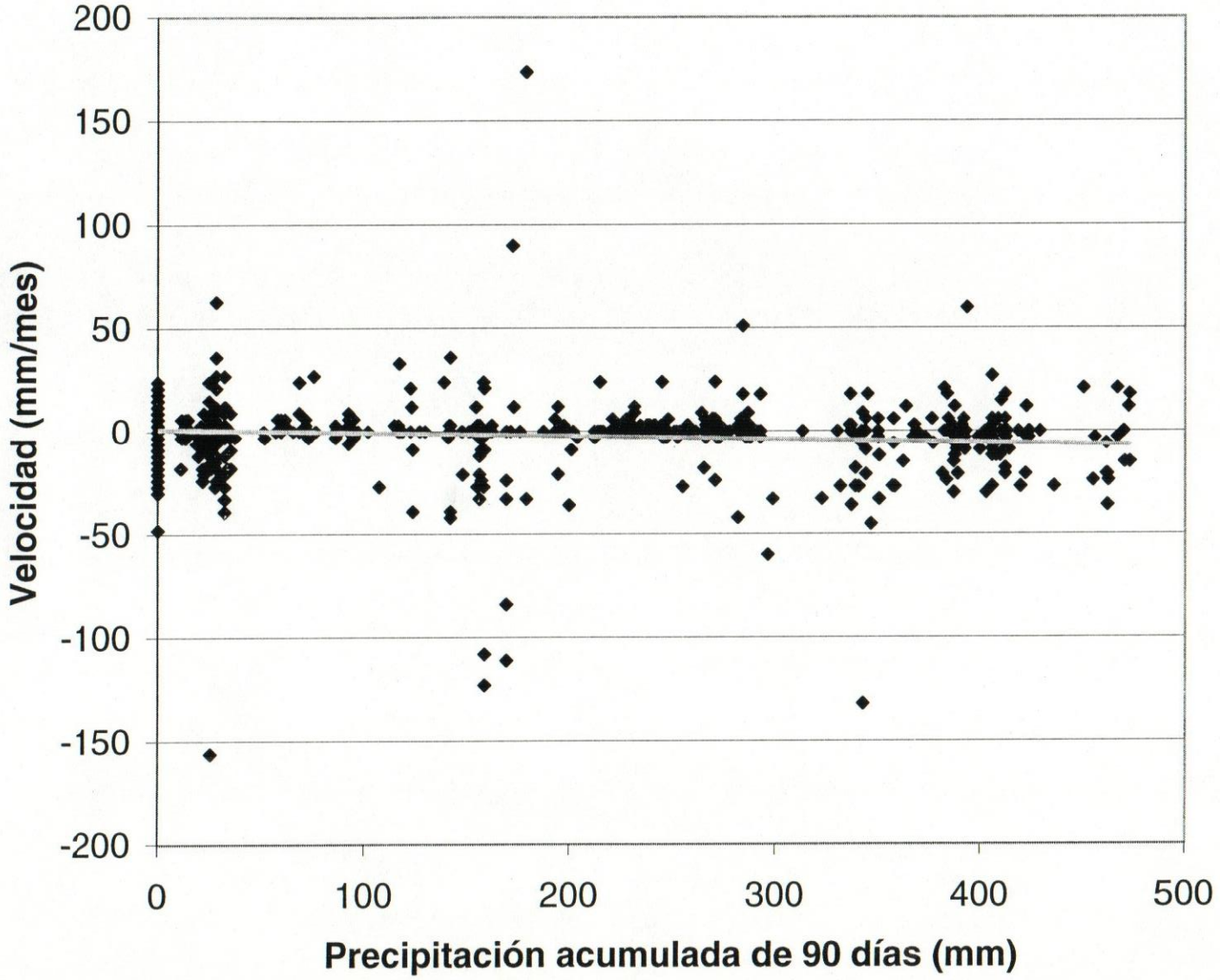
Extensómetro N° 3



$y = -0.0507x + 4.368$

$R^2 = 0.0017$

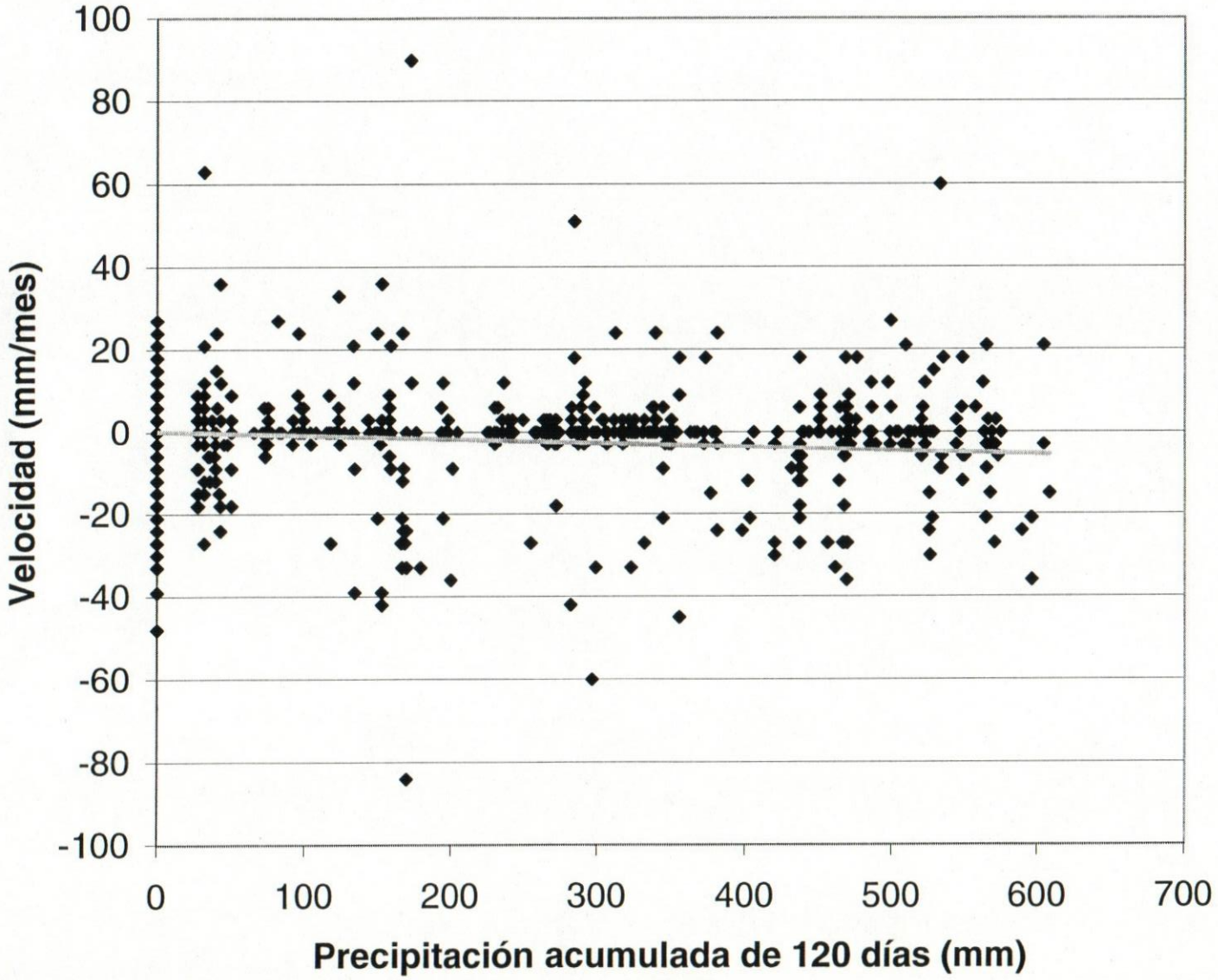
Extensómetro N° 3



$y = -0.0169x + 1.0472$

$R^2 = 0.0004$

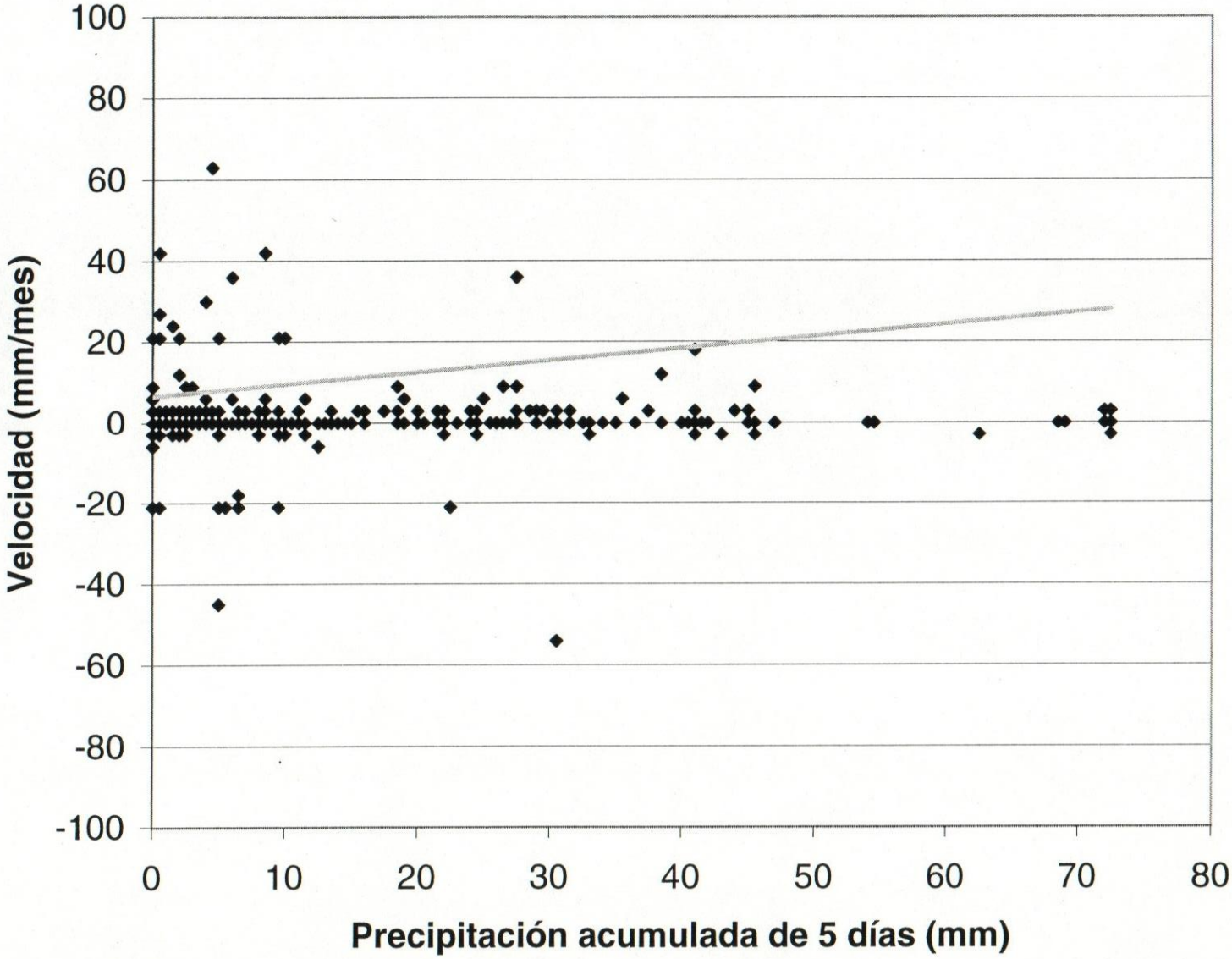
Extensómetro N° 3



$y = -0.0097x + 0.2168$

$R^2 = 0.0002$

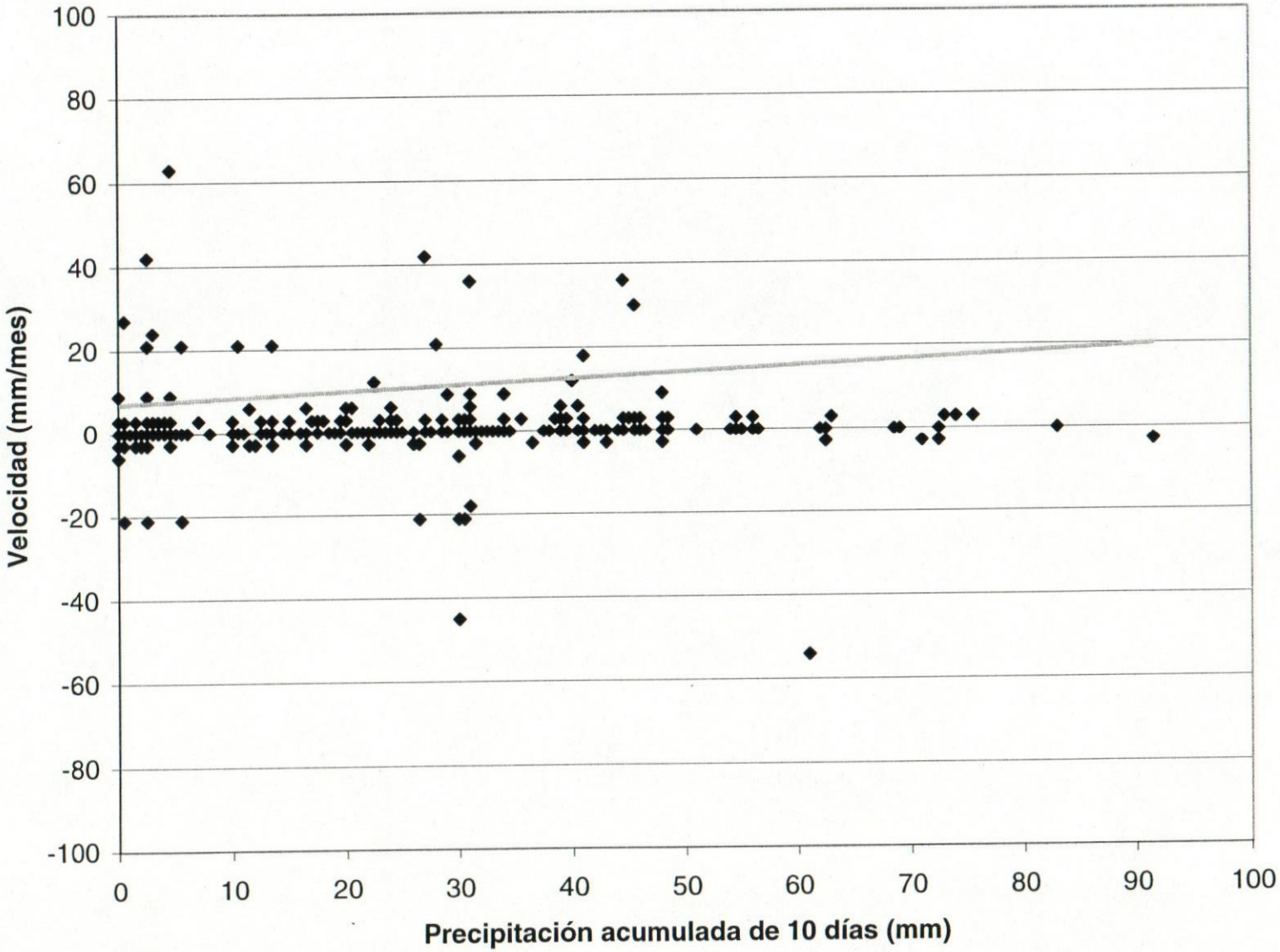
Extensómetro N° 4



$y = 0.2961x + 6.6042$

$R^2 = 0.0013$

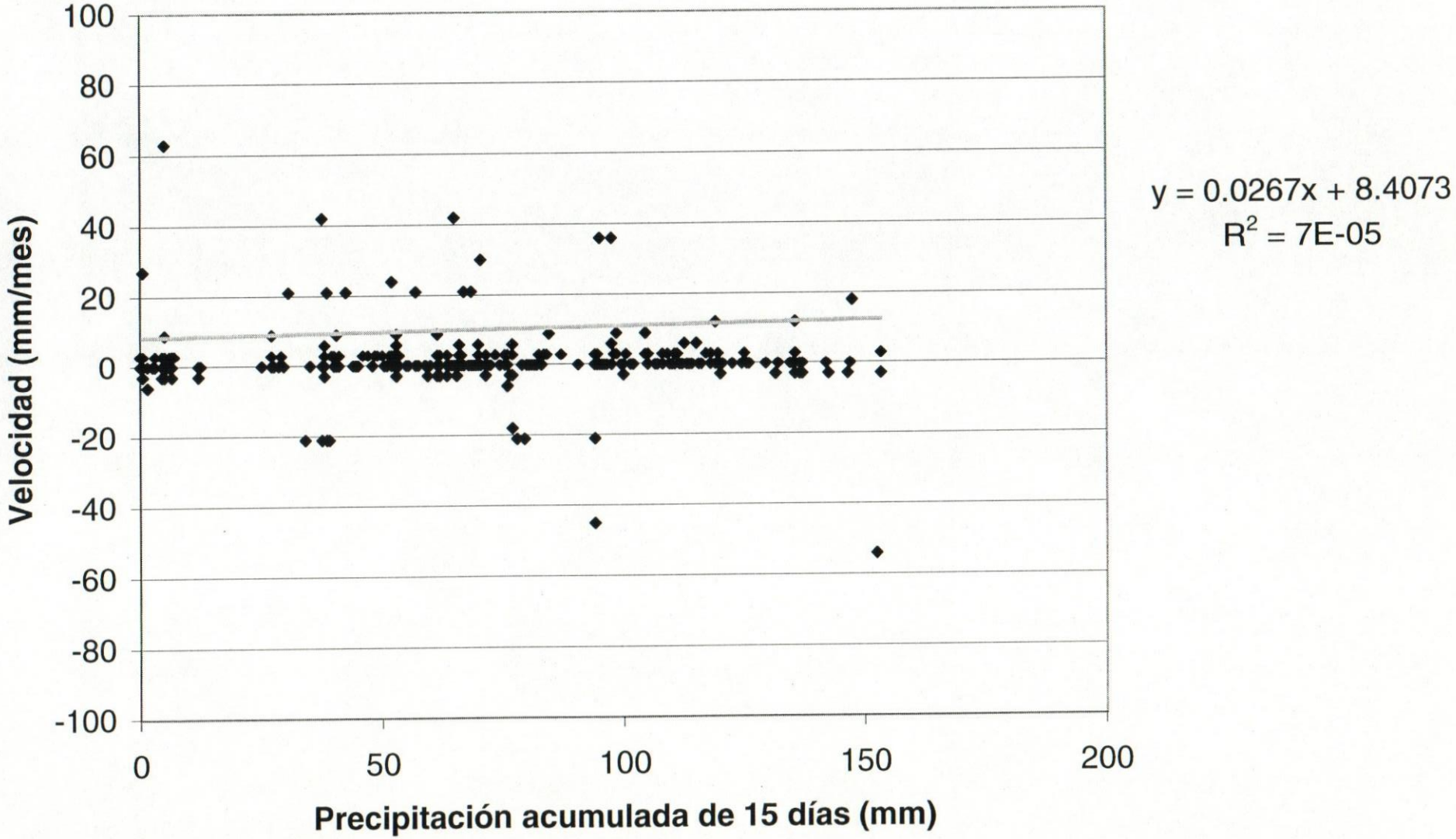
Extensómetro N° 4



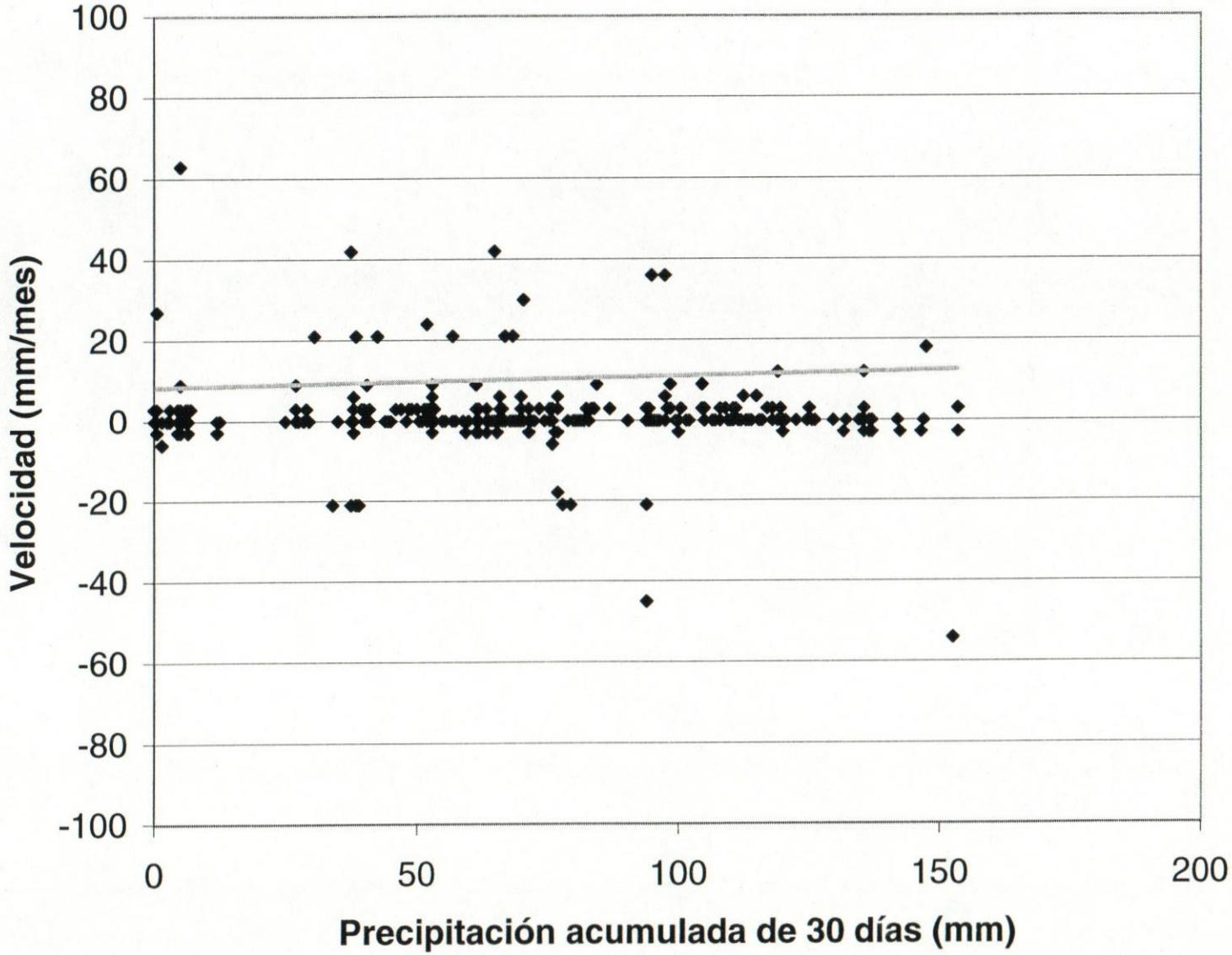
$y = 0.1396x + 7.0538$

$R^2 = 0.0005$

Extensómetro N° 4



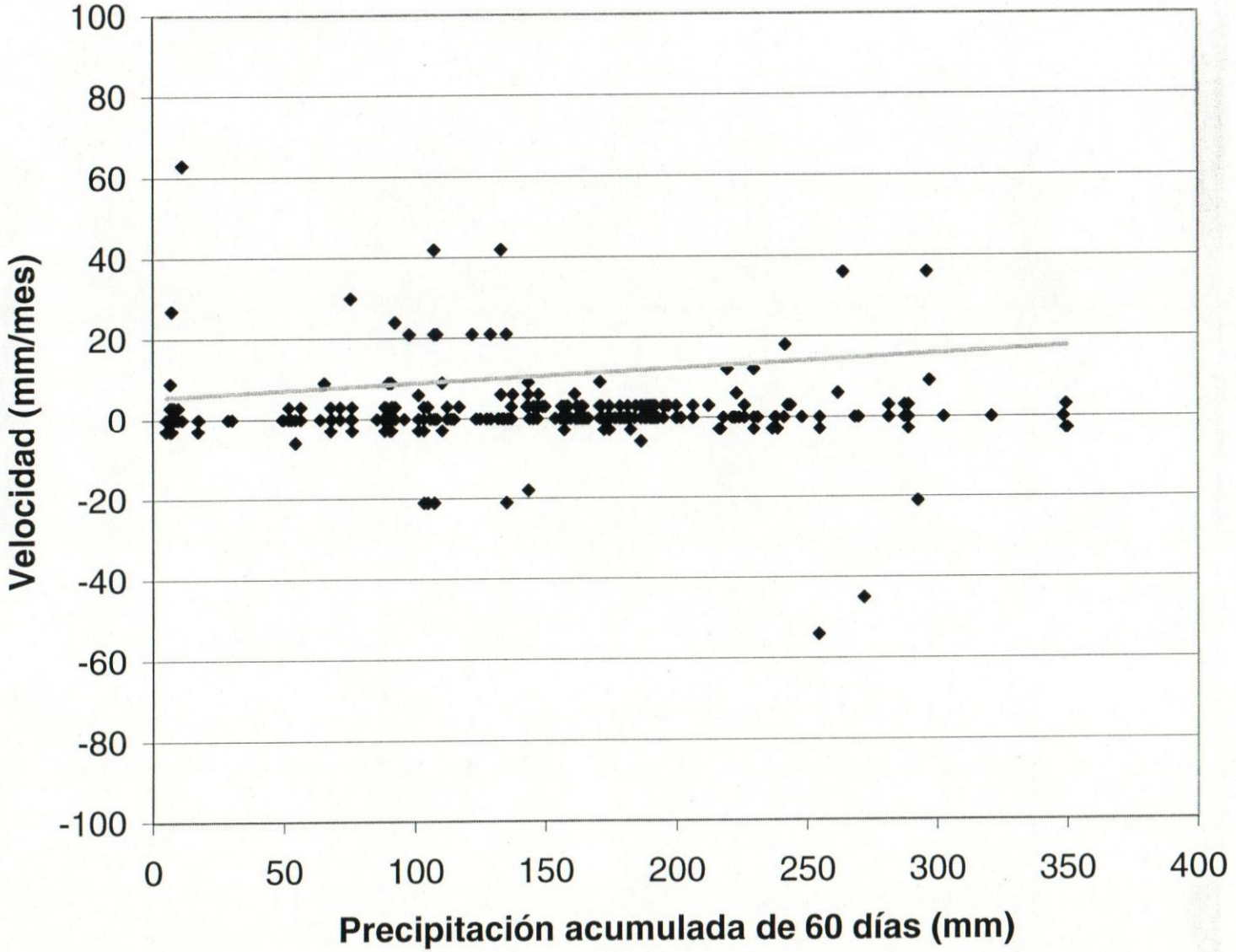
Extensómetro N° 4



$y = 0.0267x + 8.4073$

$R^2 = 7E\text{-}05$

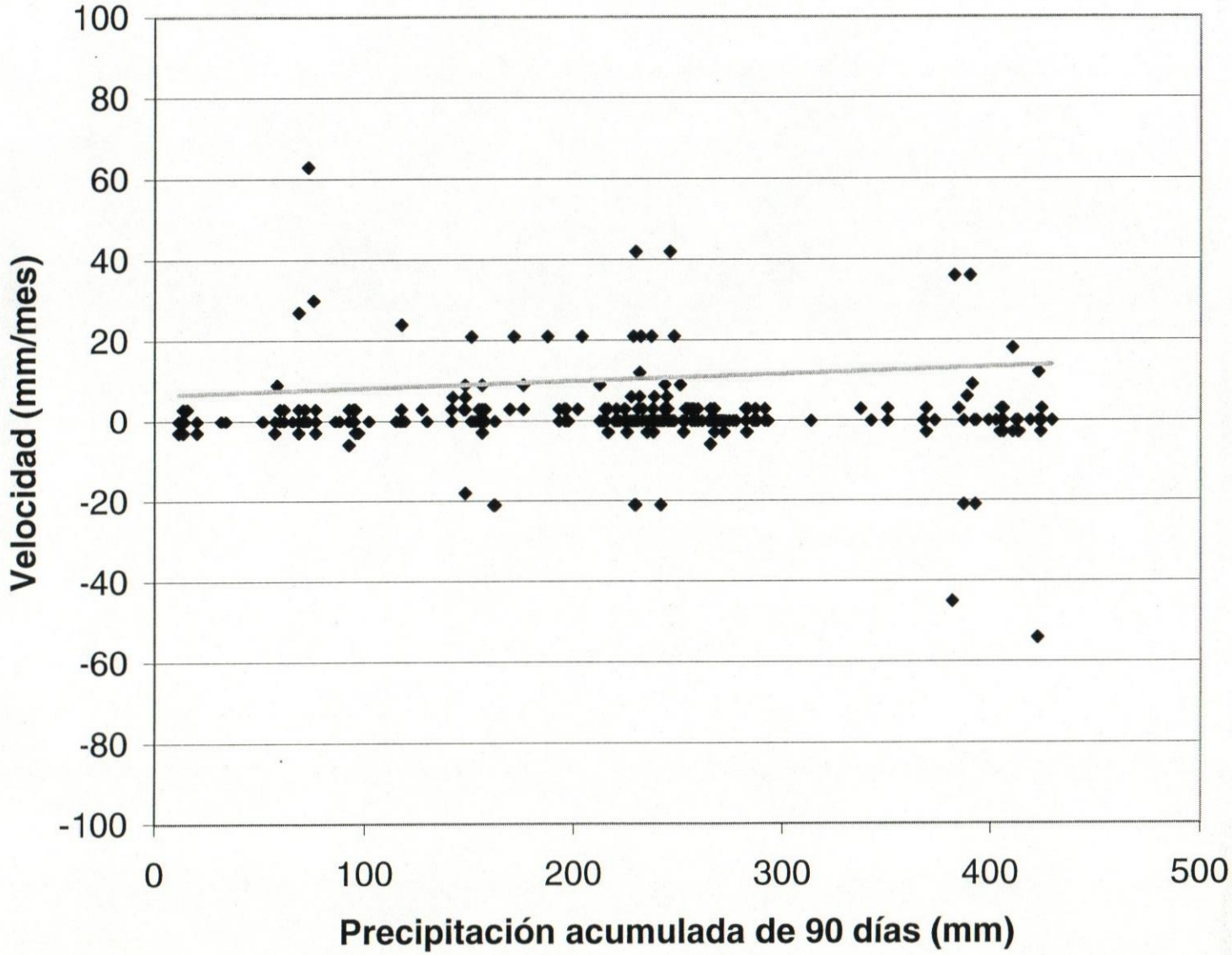
Extensómetro N° 4



$y = 0.0346x + 5.4223$

$R^2 = 0.0004$

Extensómetro N°4



$y = 0.017x + 6.5615$

$R^2 = 0.0002$

1.2 Velocidad Mensual

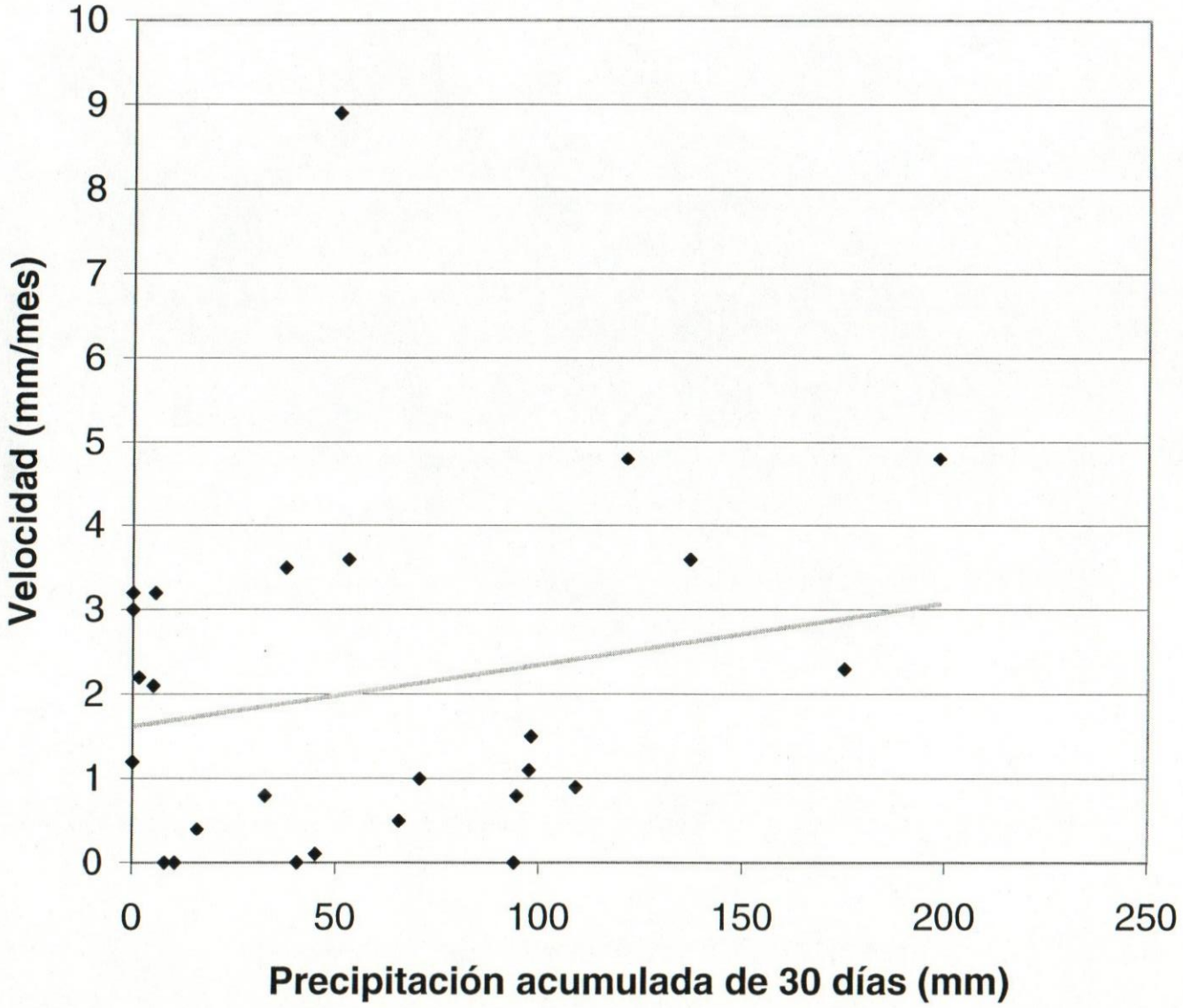
Extensómetro N°1	
Días Prec. Acum.	factor R2
30	0.0401
60	0.0018
90	0.0052
120	0.0071

Extensómetro N°2	
Días Prec. Acum.	factor R2
30	0.0233
60	0.0057
90	0.0019
120	0.0016

Extensómetro N°3	
Días Prec. Acum.	factor R2
30	0.0732
60	**0.1165**
90	0.0798
120	0.0543

Extensómetro N°4	
Días Prec. Acum.	factor R2
30	0.0006
60	0.0127
90	0.102
120	0.0772

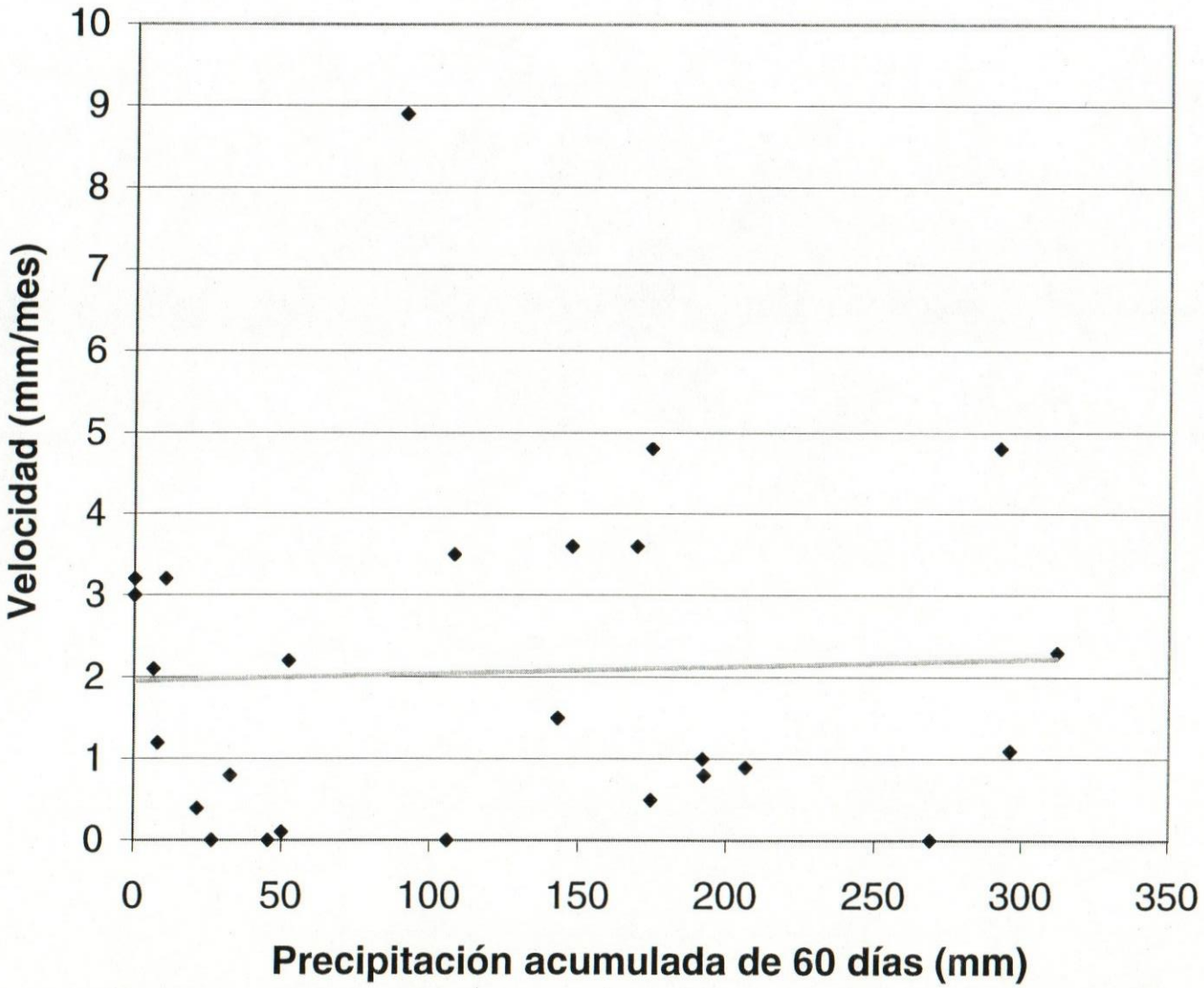
Extensómetro N° 1



$y = 0.0073x + 1.6168$

$R^2 = 0.0401$

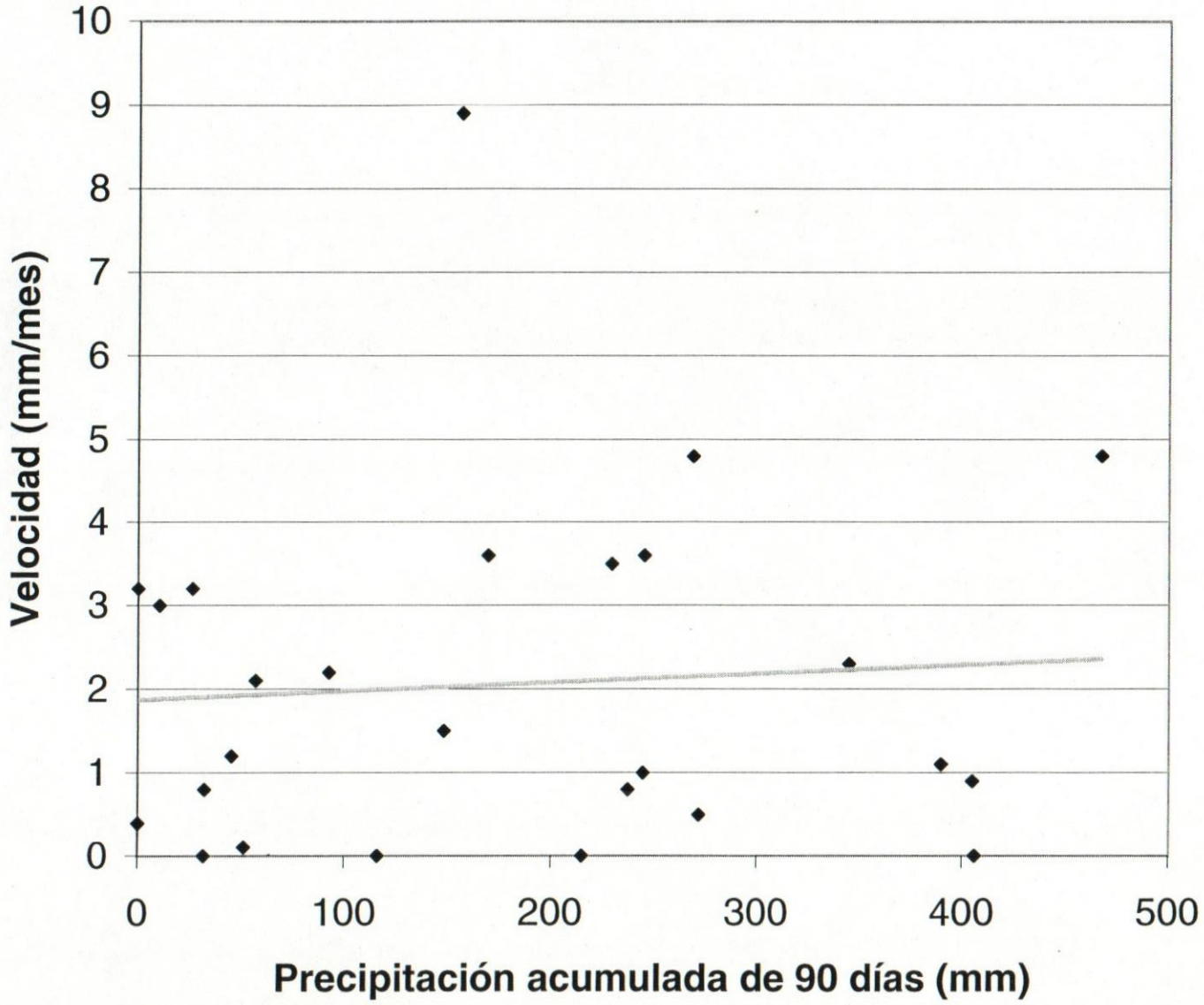
Extensómetro N° 1



$y = 0.0009x + 1.9529$

$R^2 = 0.0018$

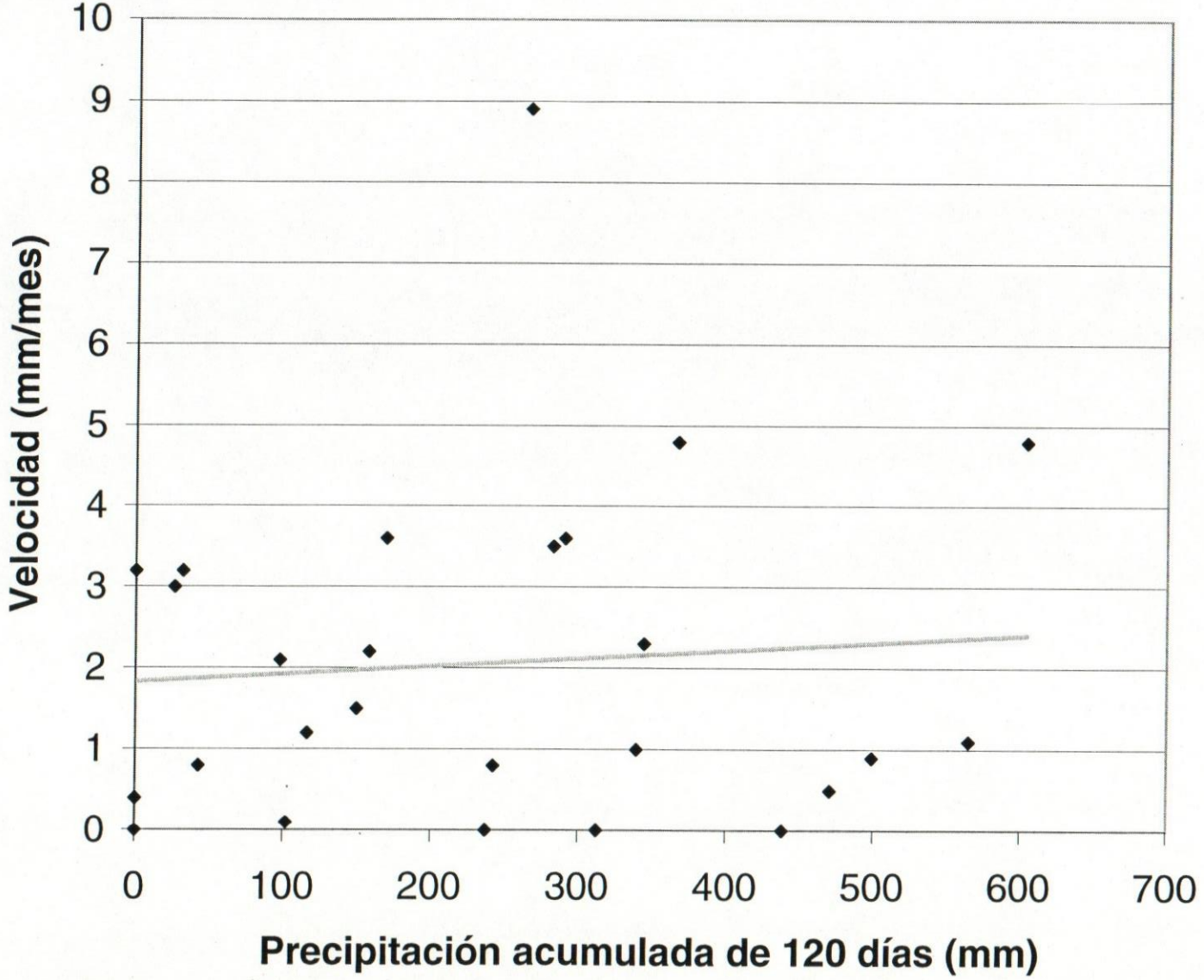
Extensómetro N° 1



$y = 0.001x + 1.8713$

$R^2 = 0.0052$

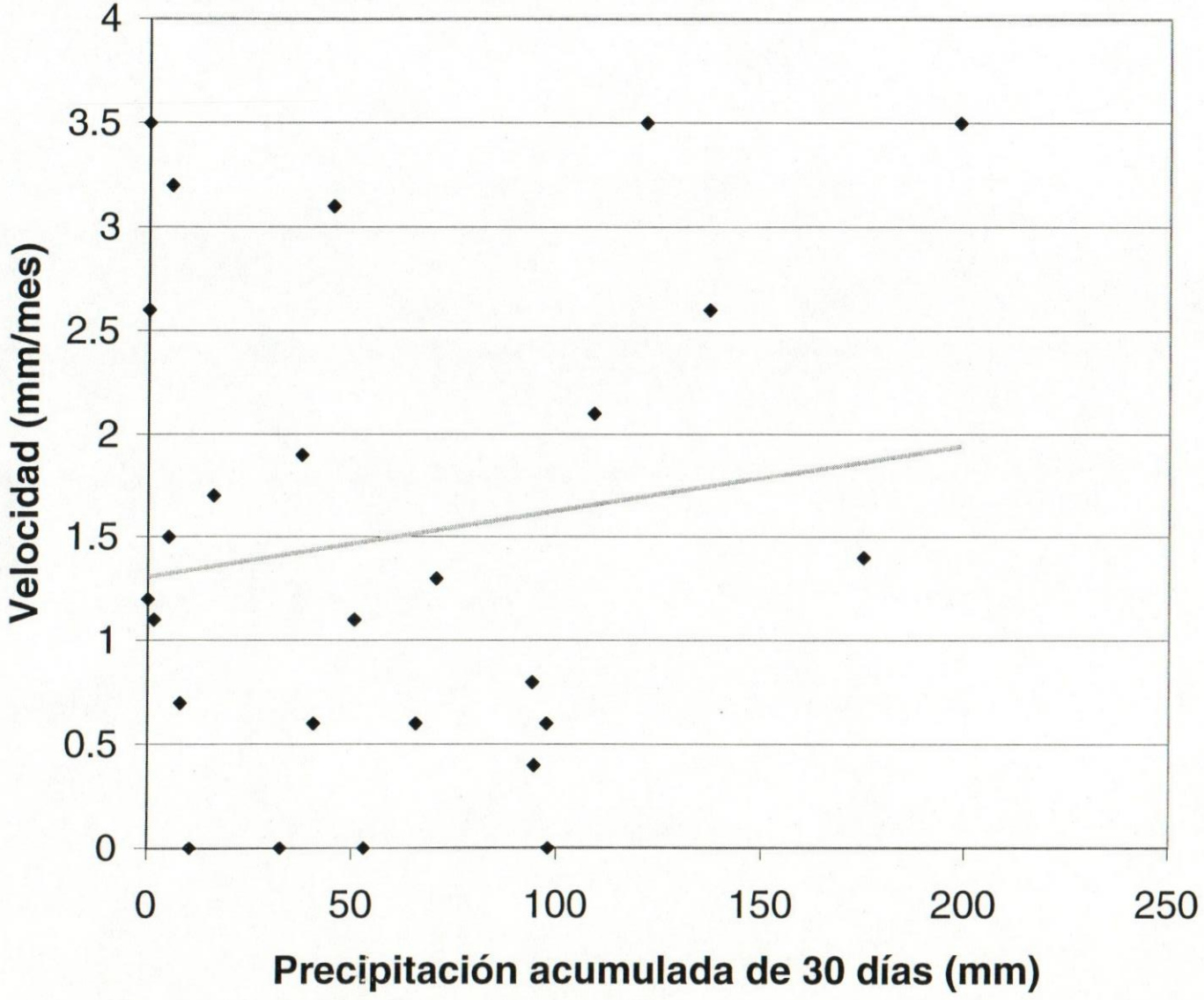
Extensómetro N° 1



$y = 0.001x + 1.8318$

$R^2 = 0.0071$

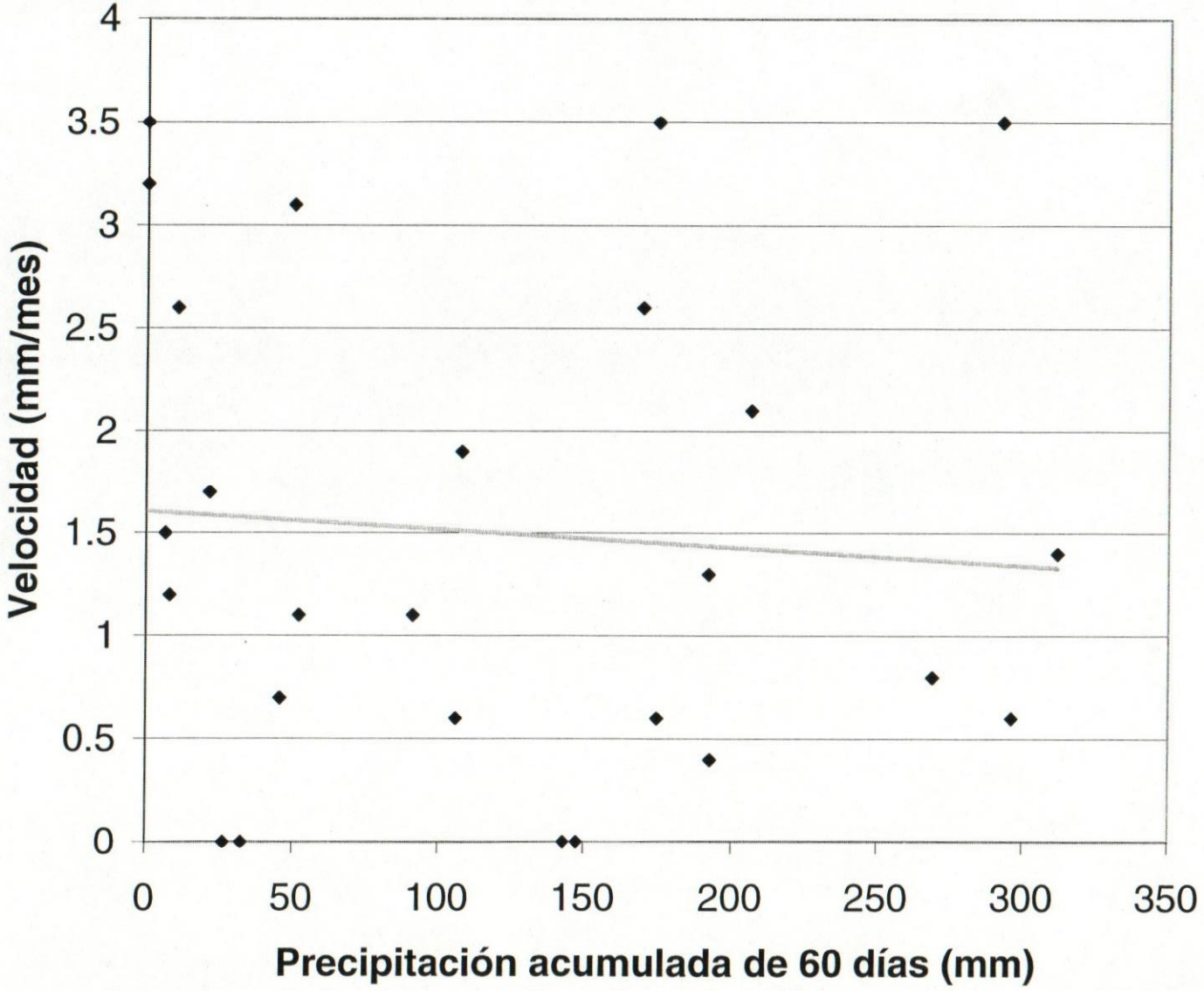
Extensómetro N° 2



$y = 0.0032x + 1.3075$

$R^2 = 0.0233$

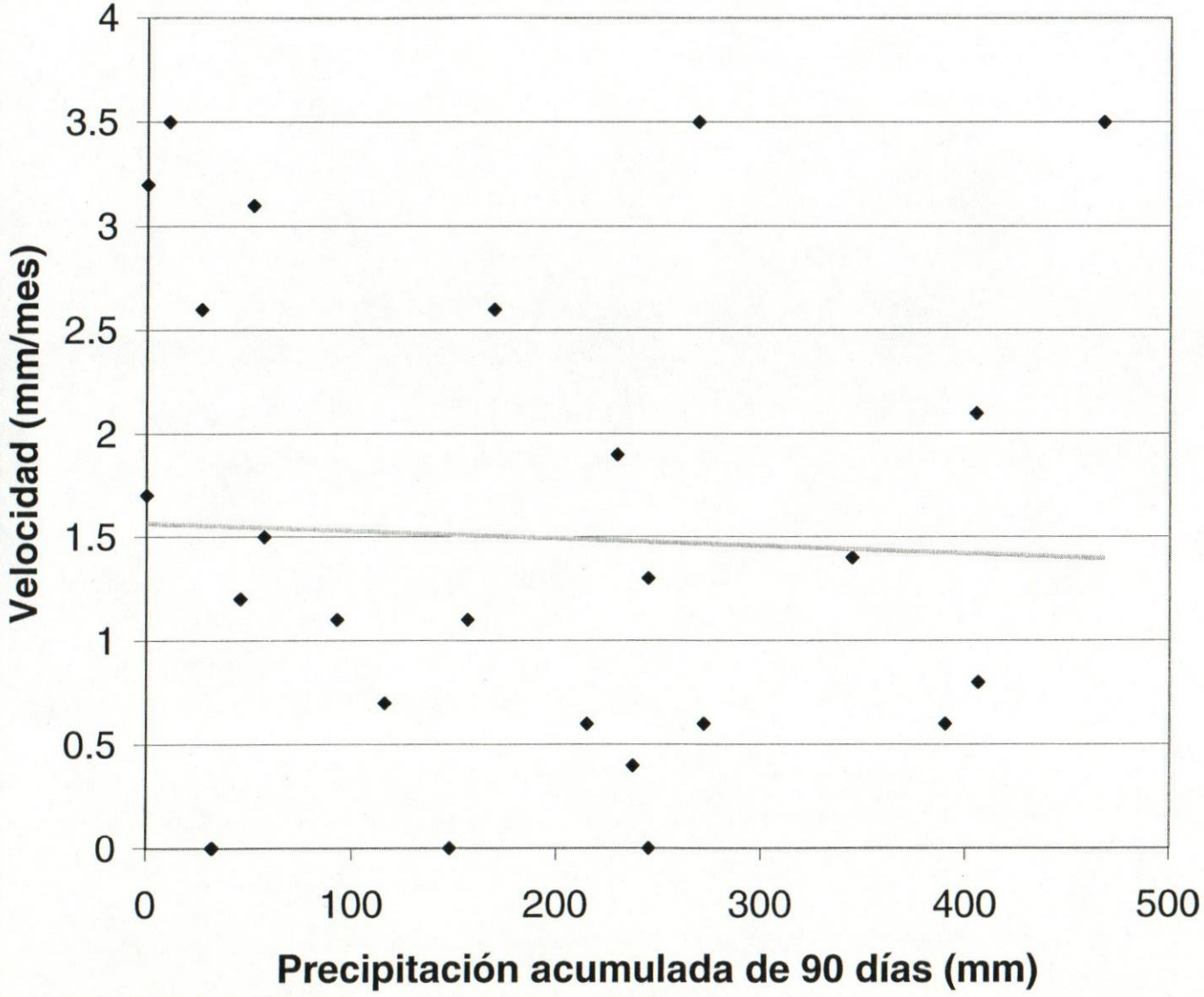
Extensómetro N° 2



$y = -0.0009x + 1.6059$

$R^2 = 0.0057$

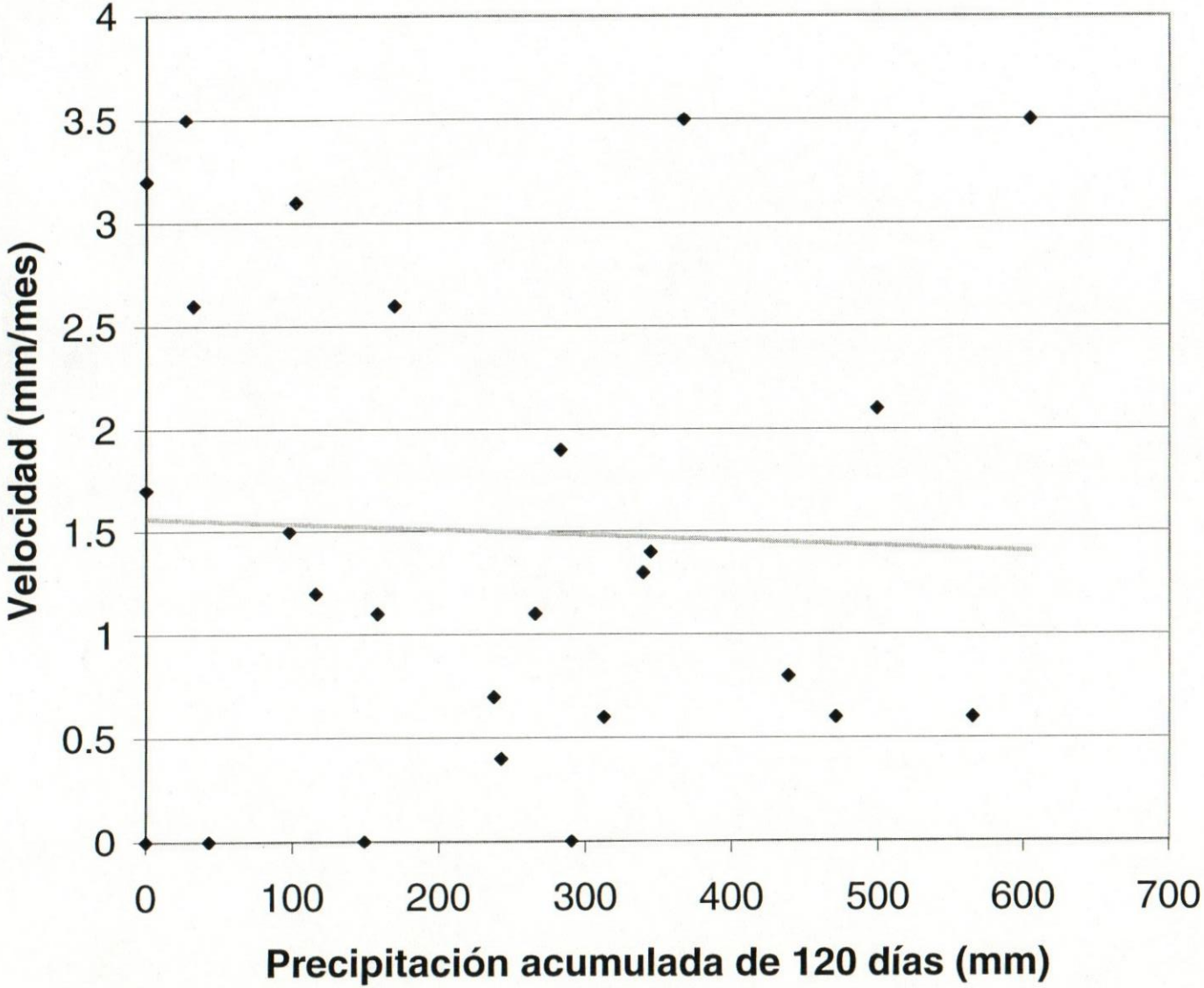
Extensómetro N° 2



$y = -0.0004x + 1.5647$

$R^2 = 0.0019$

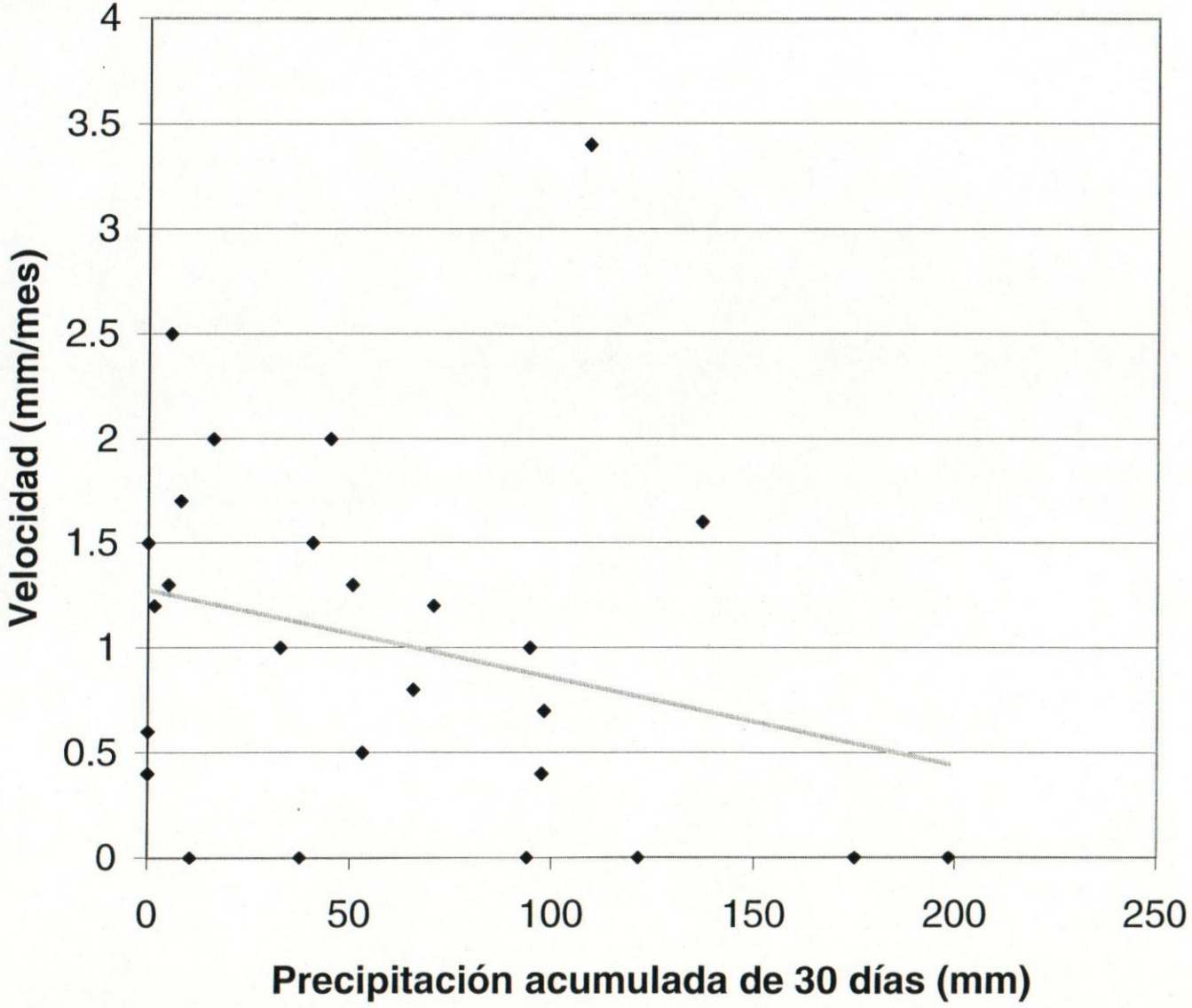
Extensómetro N° 2



$y = -0.0003x + 1.562$

$R^2 = 0.0016$

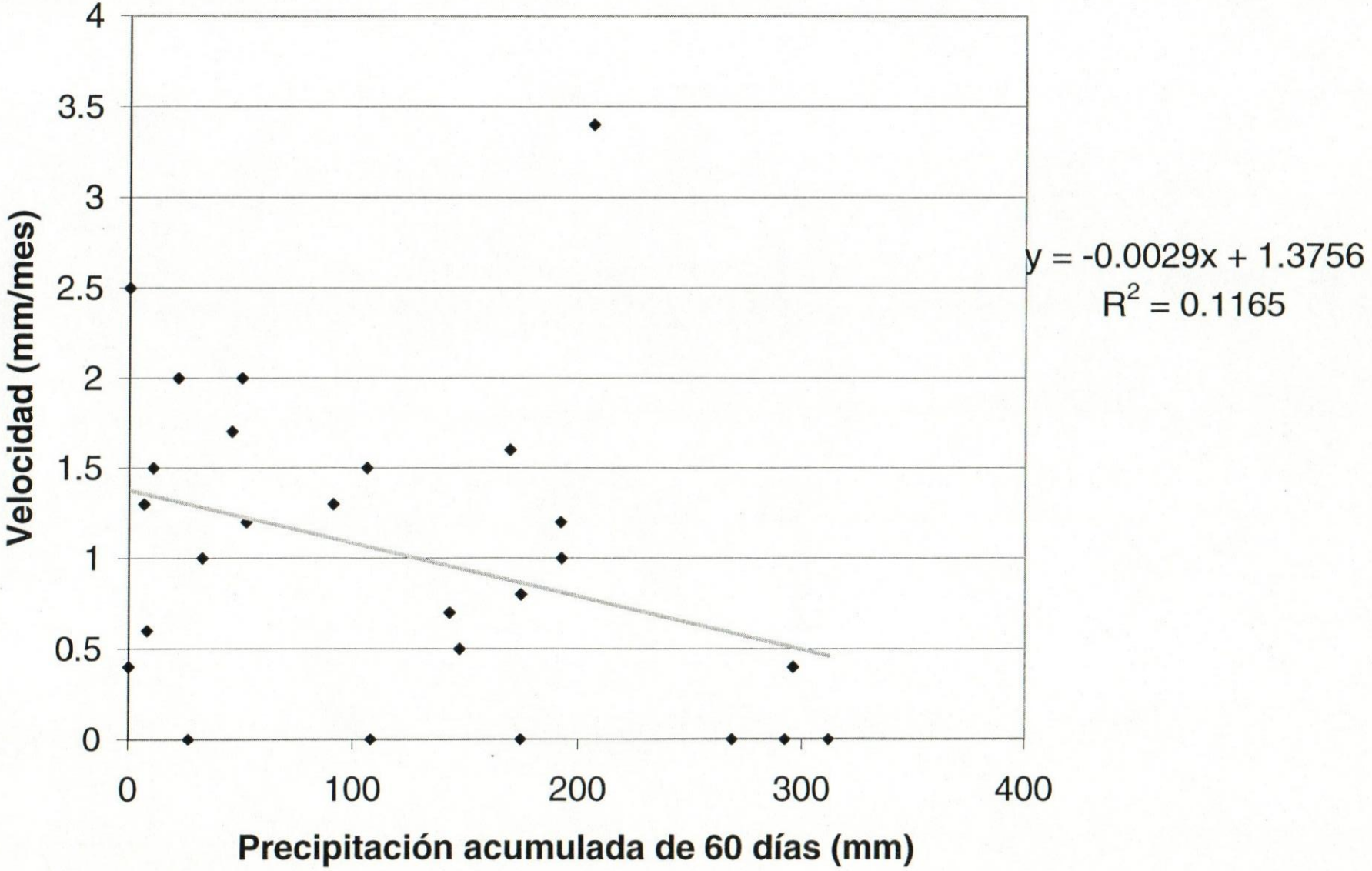
Extensómetro N° 3



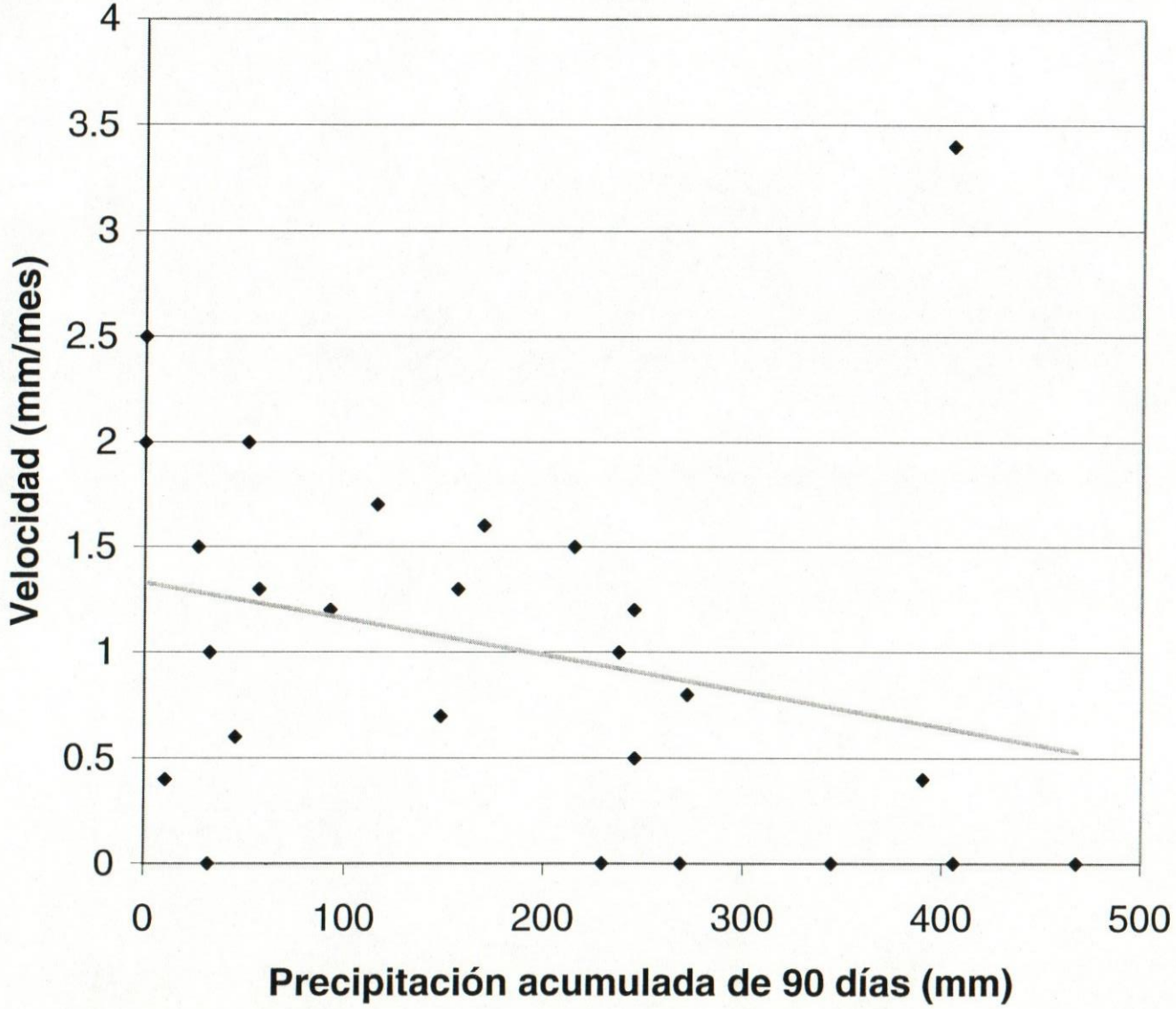
$y = -0.0042x + 1.2747$

$R^2 = 0.0732$

Extensómetro N° 3



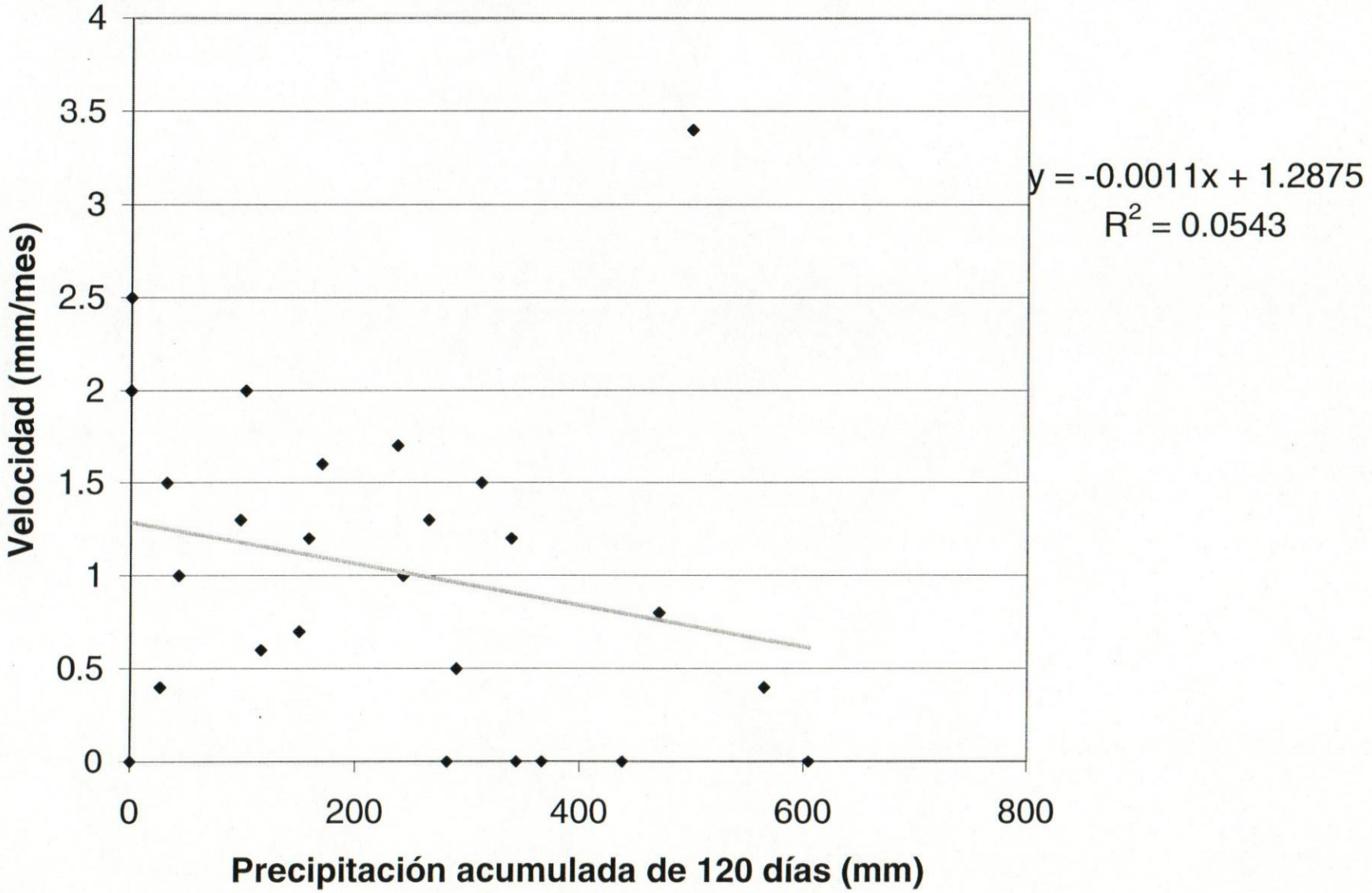
Extensómetro N° 3



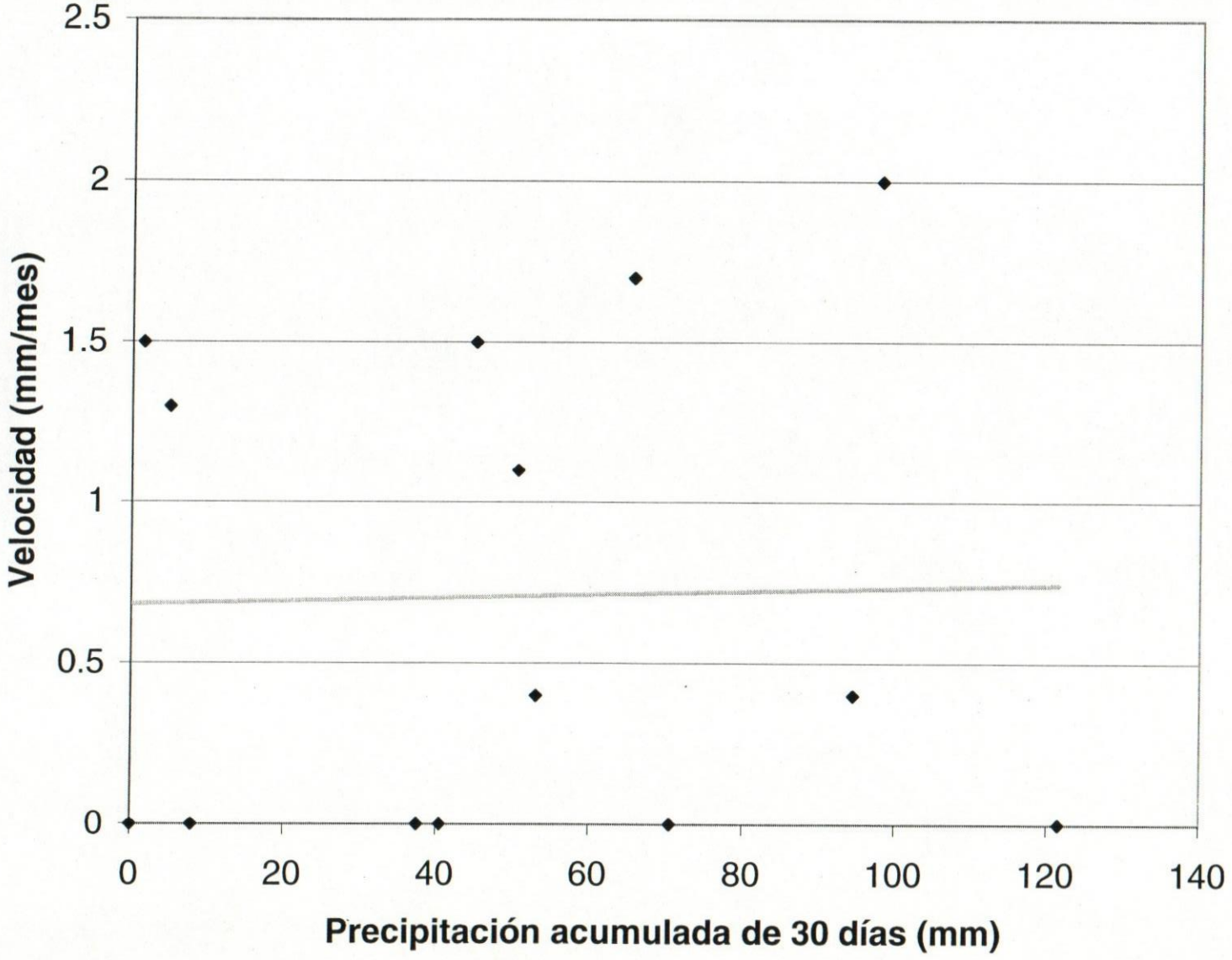
$y = -0.0017x + 1.331$

$R^2 = 0.0798$

Extensómetro N° 3



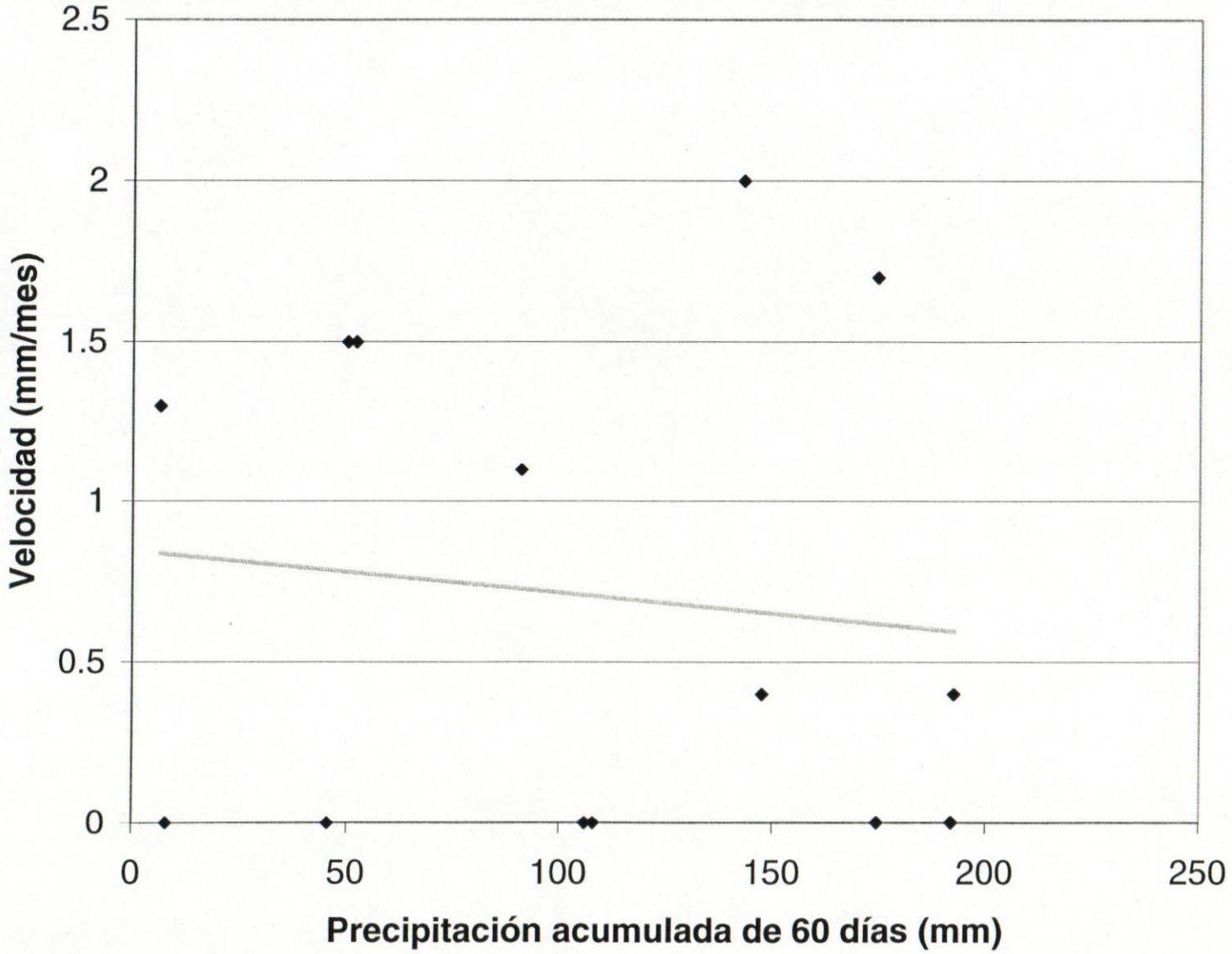
Extensómetro N° 4



$y = 0.0005x + 0.6824$

$R^2 = 0.0006$

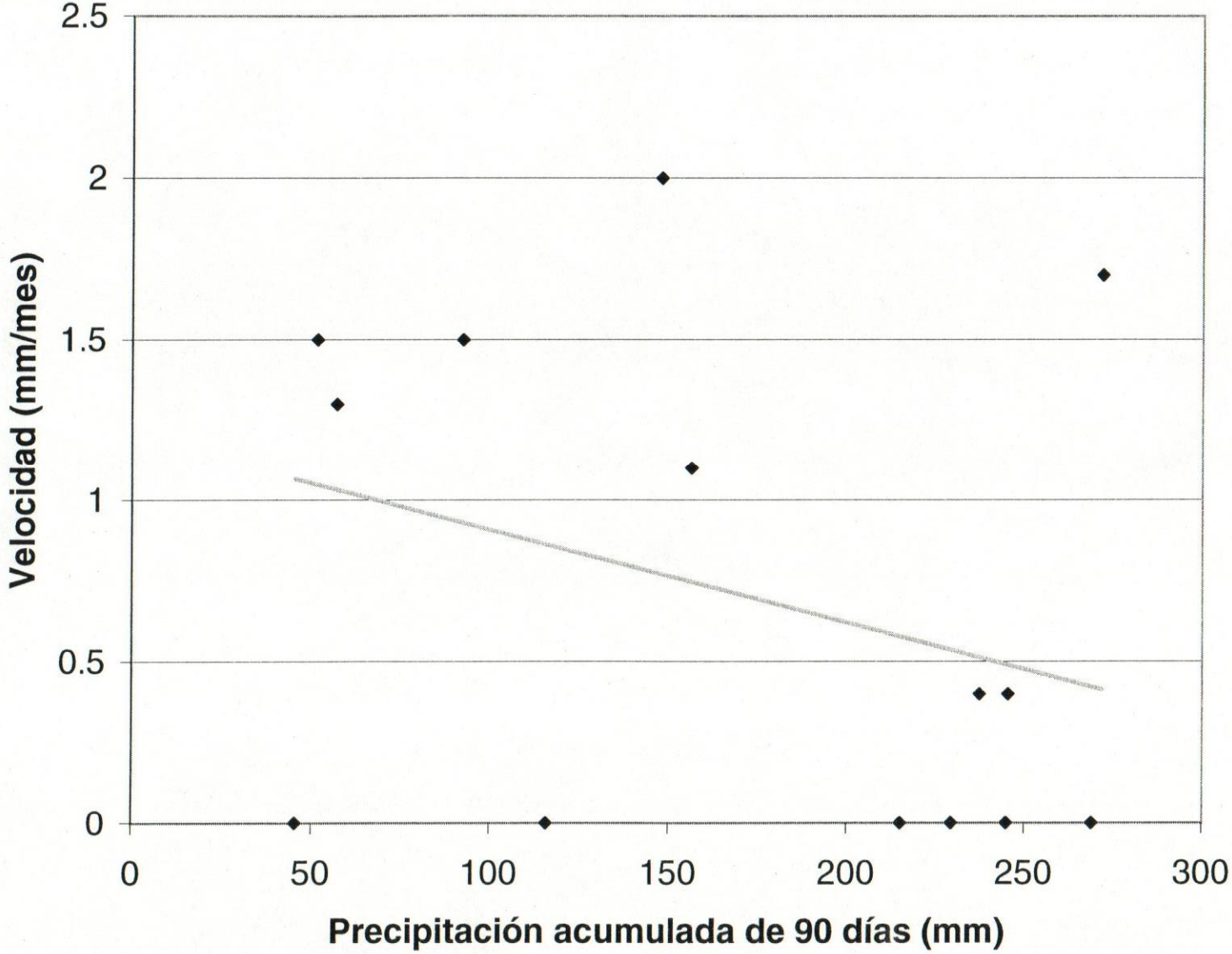
Extensómetro N° 4



$y = -0.0013x + 0.8462$

$R^2 = 0.0127$

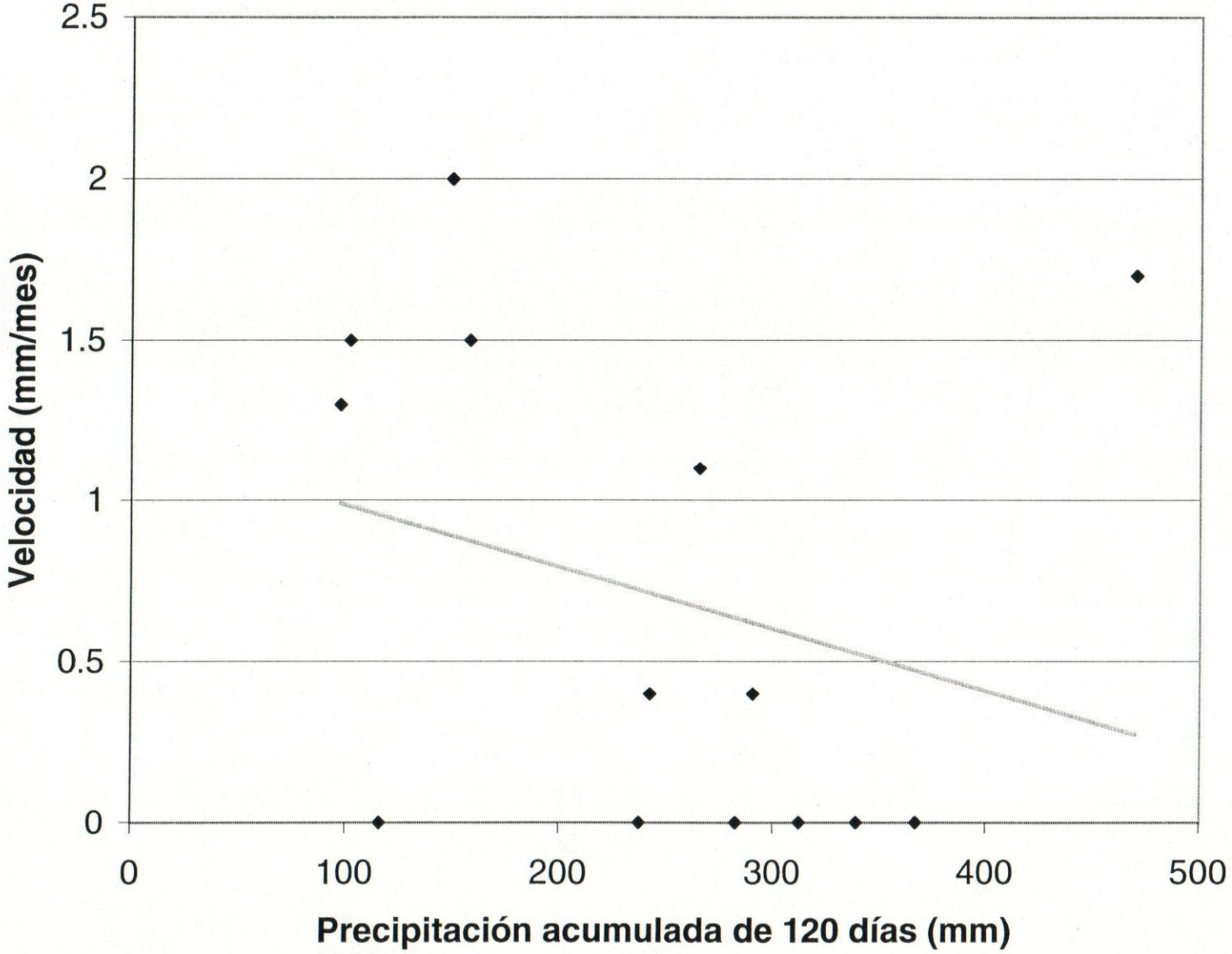
Extensómetro N° 4



$y = -0.0029x + 1.197$

$R^2 = 0.102$

Extensómetro N° 4



$y = -0.0019x + 1.1786$

$R^2 = 0.0772$

2. *Correlación Precipitación – Movimiento Profundo*

INCLINOMETRO N°5
Período (09/93-02/95)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0271
15	0.0063
30	0.0008
60	0.0003
90	0.0037
120	0.0242

INCLINOMETRO N°15
Período (12/93-04/95)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0773
15	0.0198
30	0.003
60	0.001
90	0.00003
120	0.0009

INCLINOMETRO N°17
Período (09/94-04/96)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0314
15	0.0056
30	0.0141
60	0.0004
90	0.0154
120	0.0324

INCLINOMETRO N°19
Período (09/94-06/96)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0132
15	0.0006
30	0.0112
60	0.058
90	0.0443
120	0.0682

INCLINOMETRO N°25
Período (09/94-06/96)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0973
15	0.0367
30	0.066
60	0.019
90	0.0075
120	0.00005

INCLINOMETRO N°32
Período (10/95-06/97)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0326
15	0.0249
30	0.0279
60	0.0005
90	0.01
120	0.0146

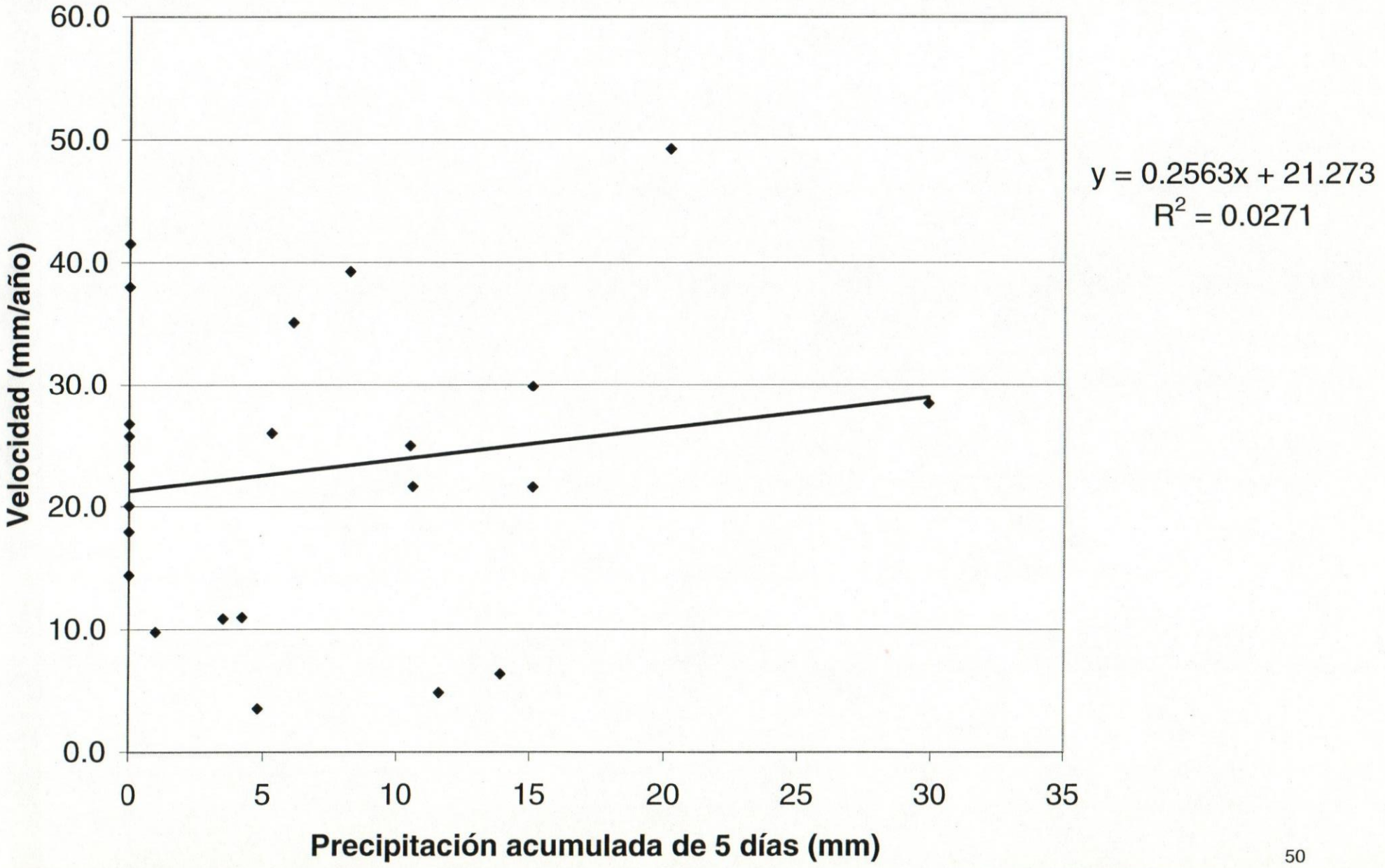
INCLINOMETRO N°16
Período (08/96-01/98)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0068
15	0.047
30	0.0175
60	0.1142
90	0.1212
120	0.1717

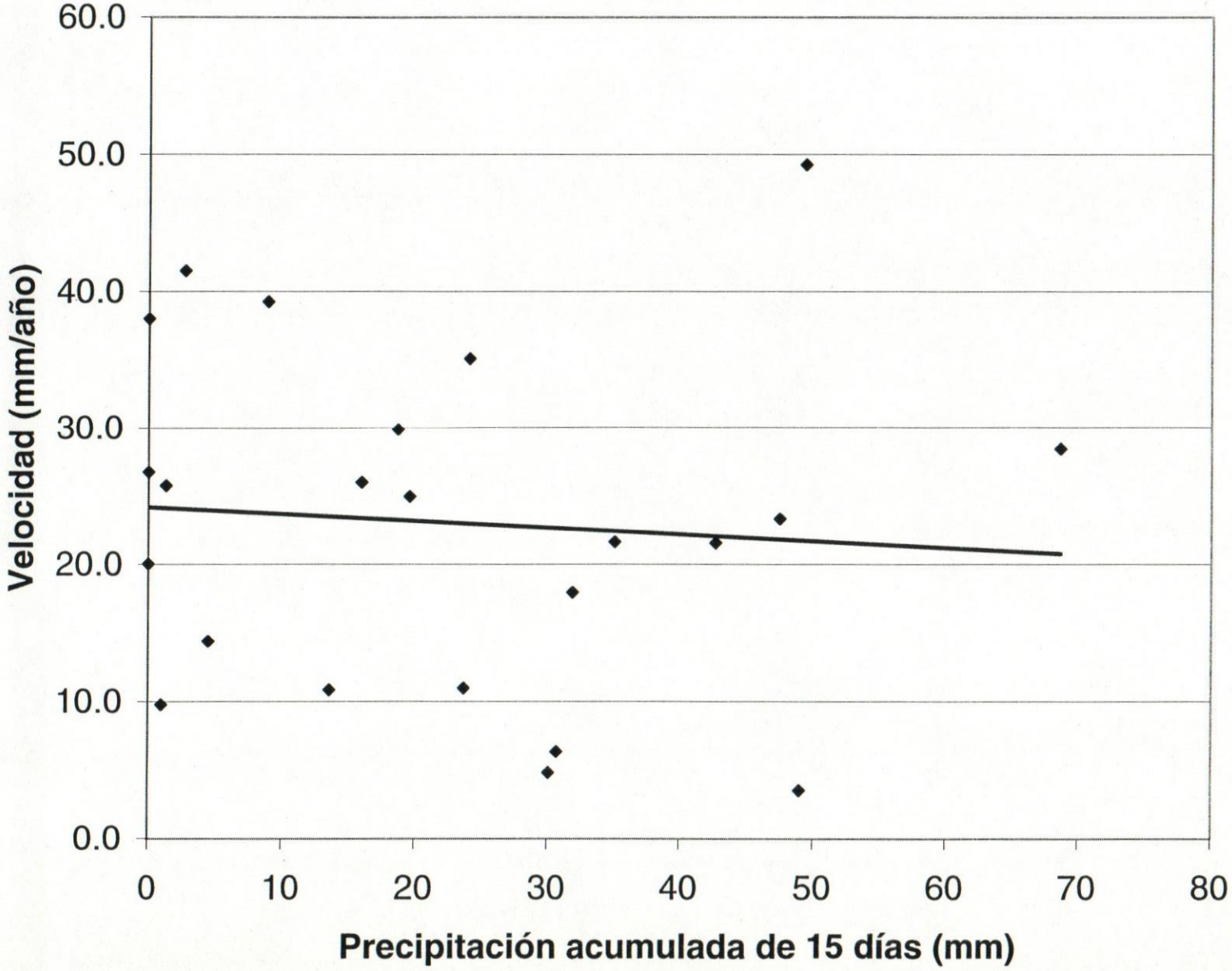
INCLINOMETRO N°36
Período (08/96-01/98)

Días Prec. Acum.	factor R2
5	0.0128
15	0.003
30	0.0642
60	0.0545
90	0.014
120	0.0165

Inclinómetro IC-5



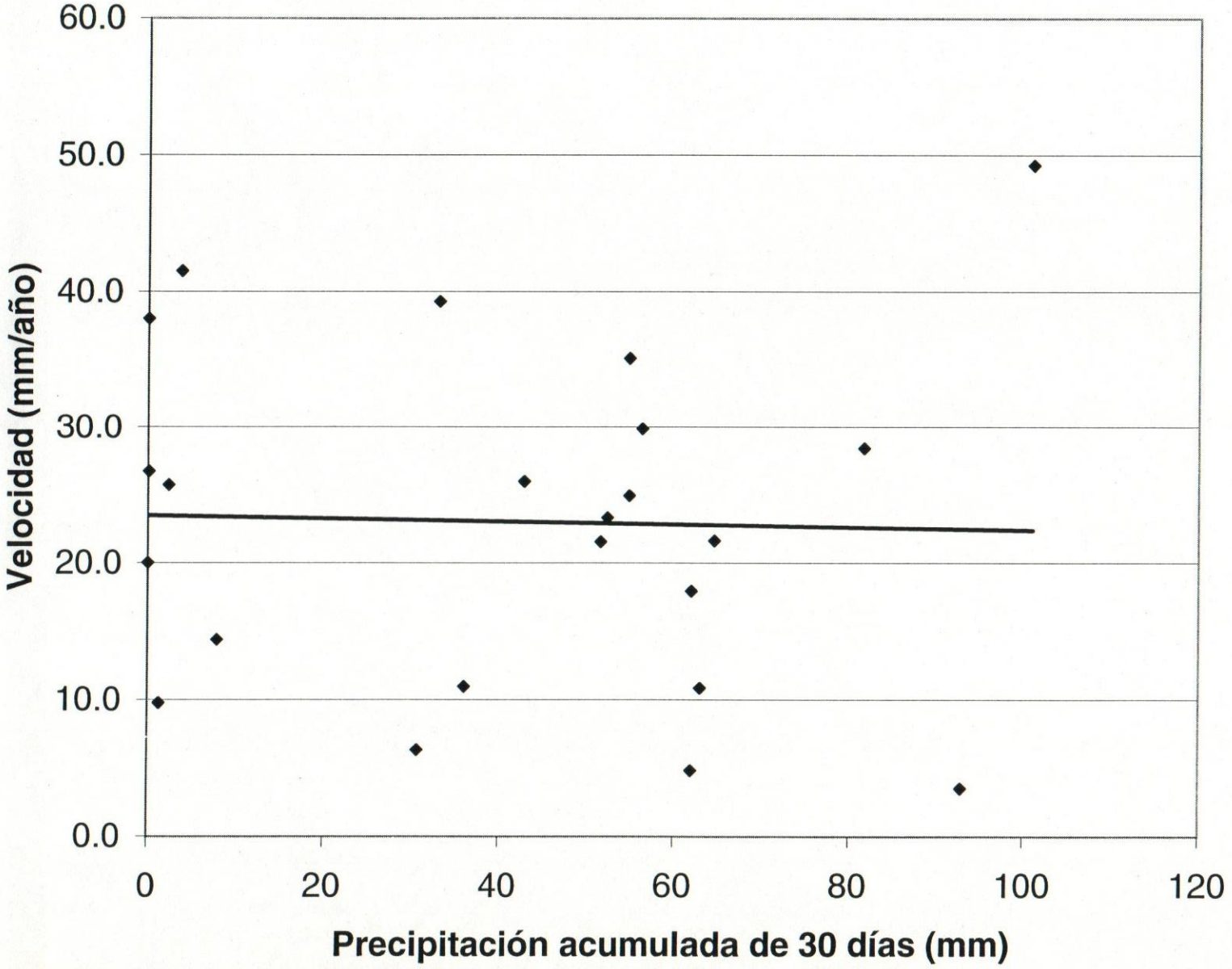
Inclinómetro IC-5



$y = -0.0498x + 24.181$

$R^2 = 0.0063$

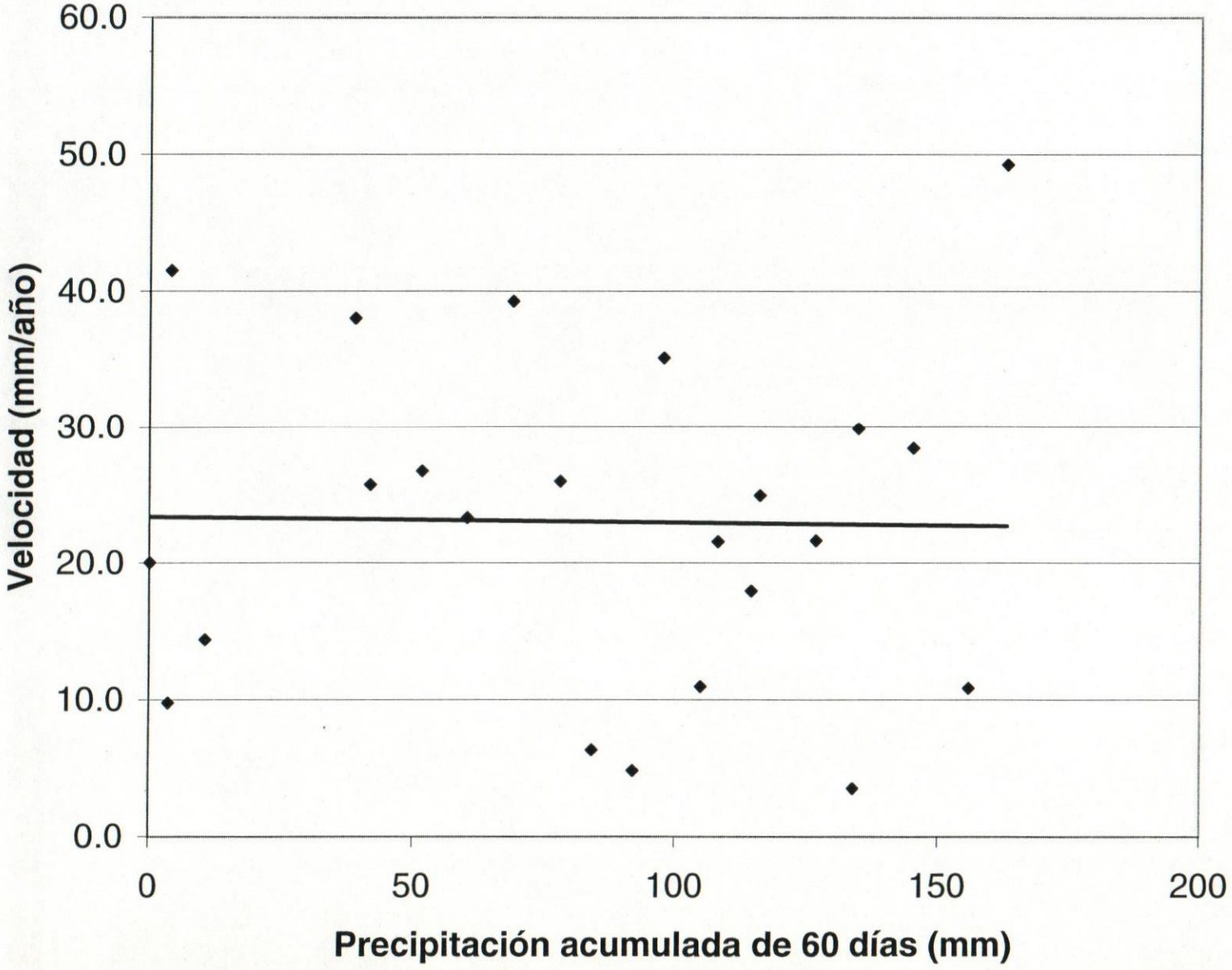
Inclinómetro IC-5



$y = -0.0111x + 23.516$

$R^2 = 0.0008$

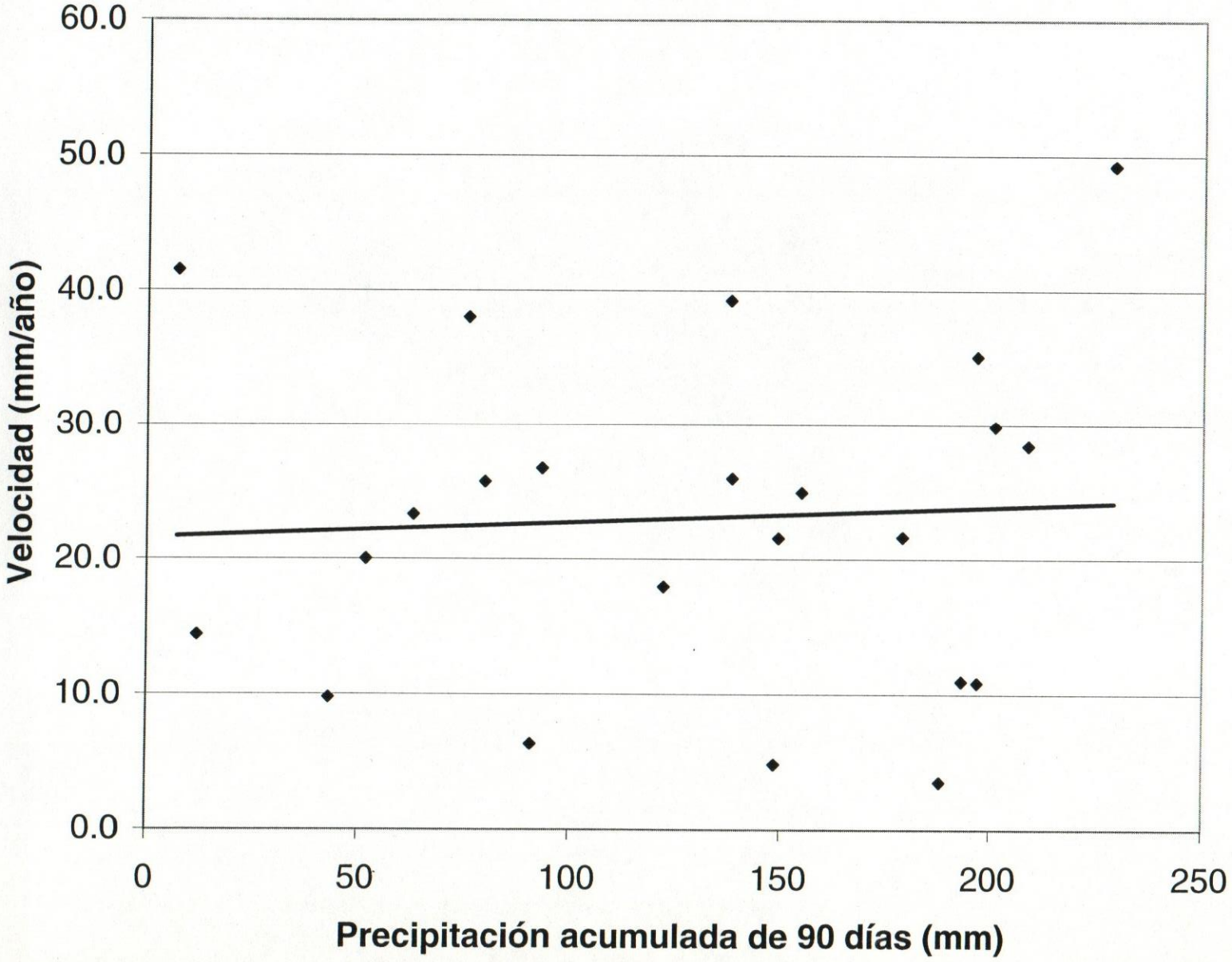
Inclinómetro IC-5



$y = -0.0041x + 23.404$

$R^2 = 0.0003$

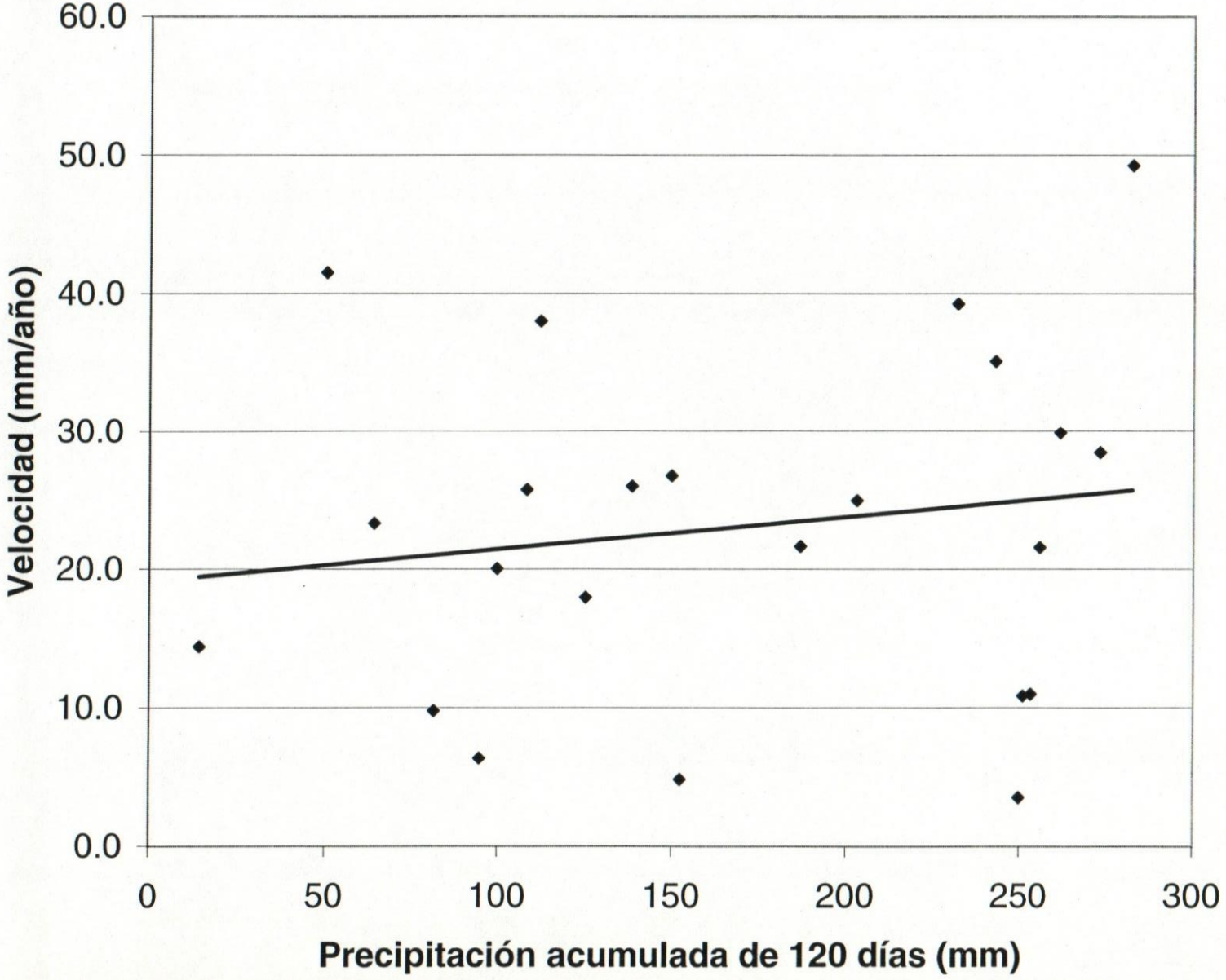
Inclinómetro IC-5



$y = 0.0113x + 21.603$

$R^2 = 0.0037$

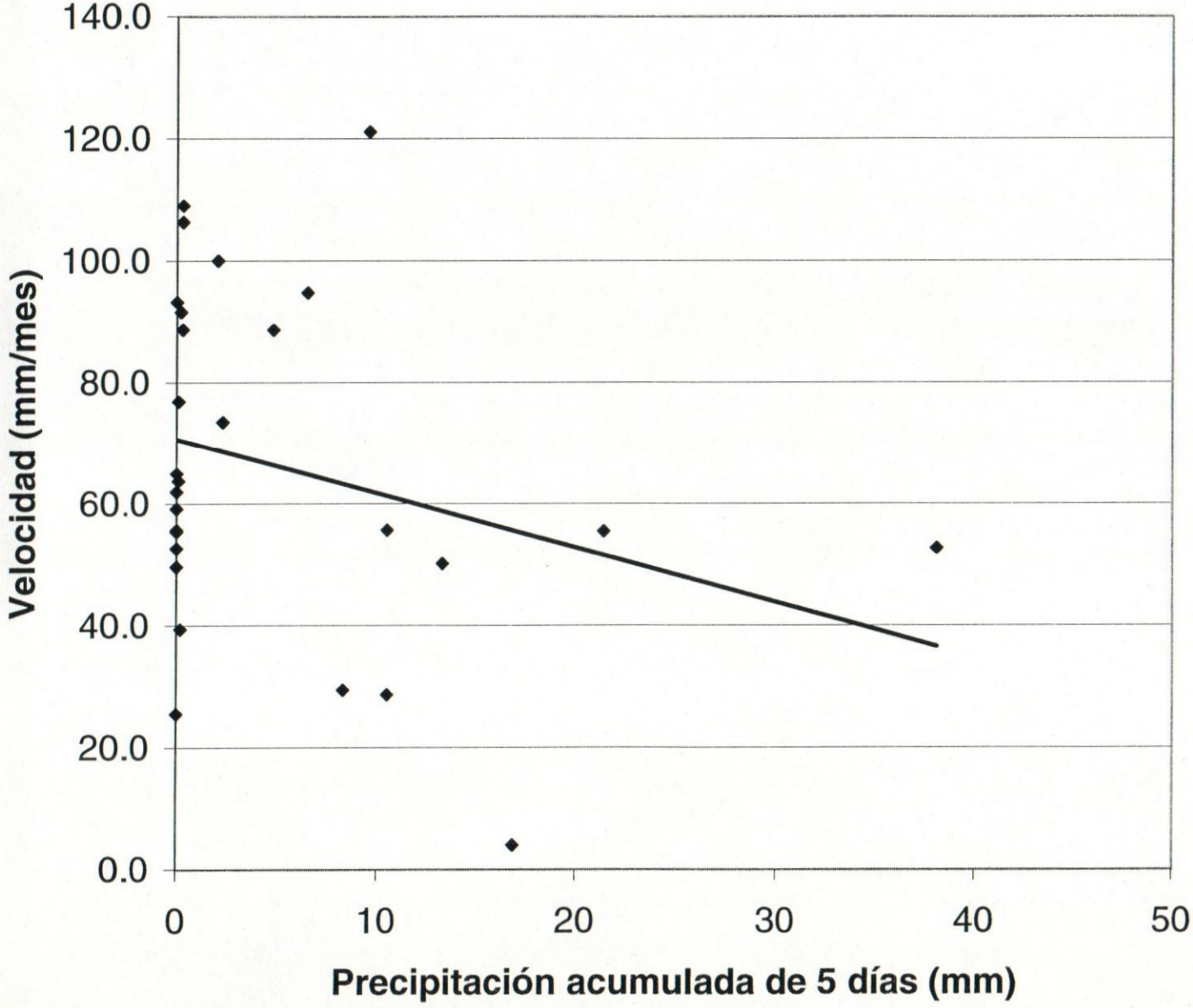
Inclinómetro IC-5



$y = 0.0233x + 19.116$

$R^2 = 0.0242$

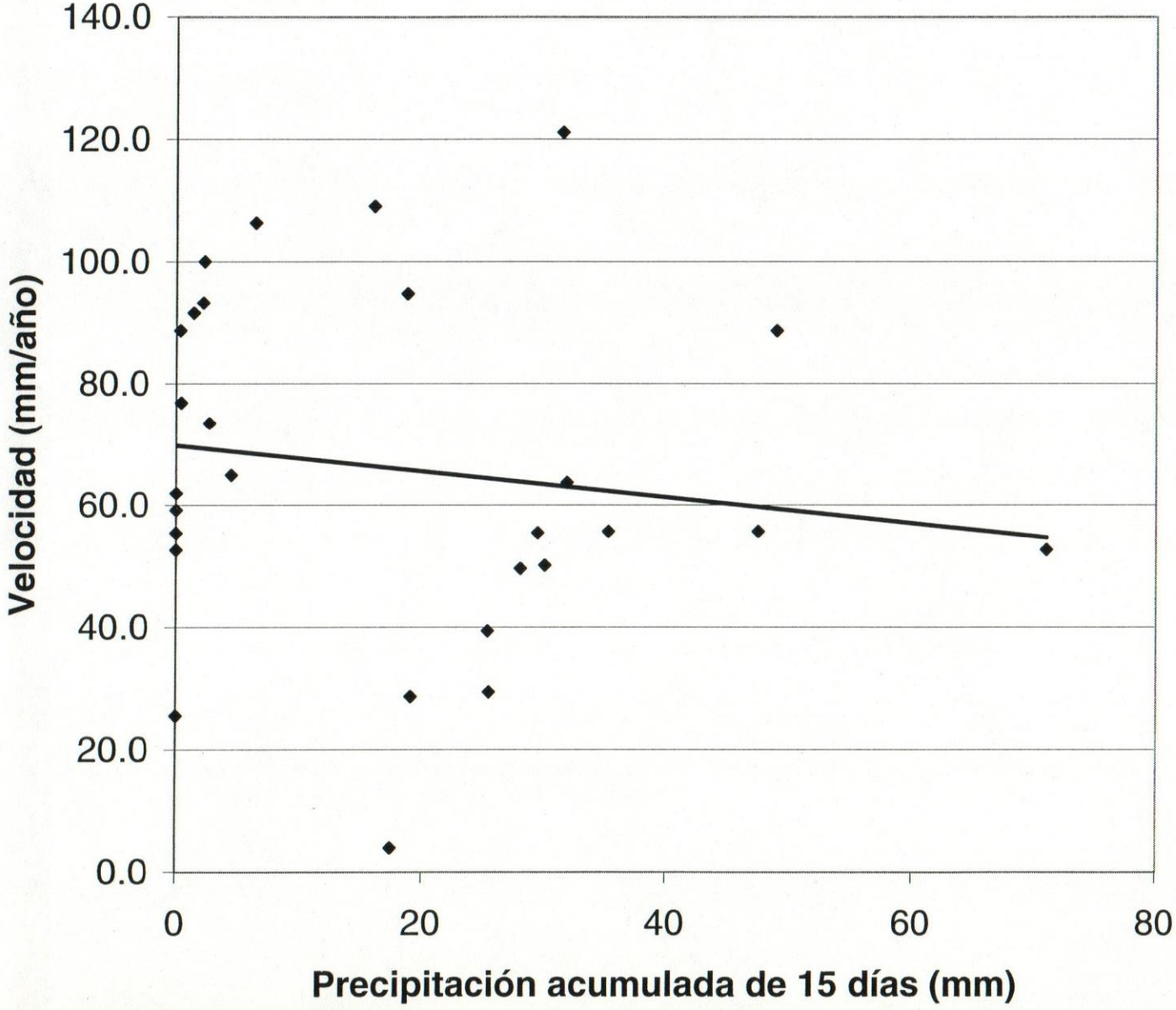
Inclinómetro IC-15



$y = -0.8947x + 70.676$

$R^2 = 0.0773$

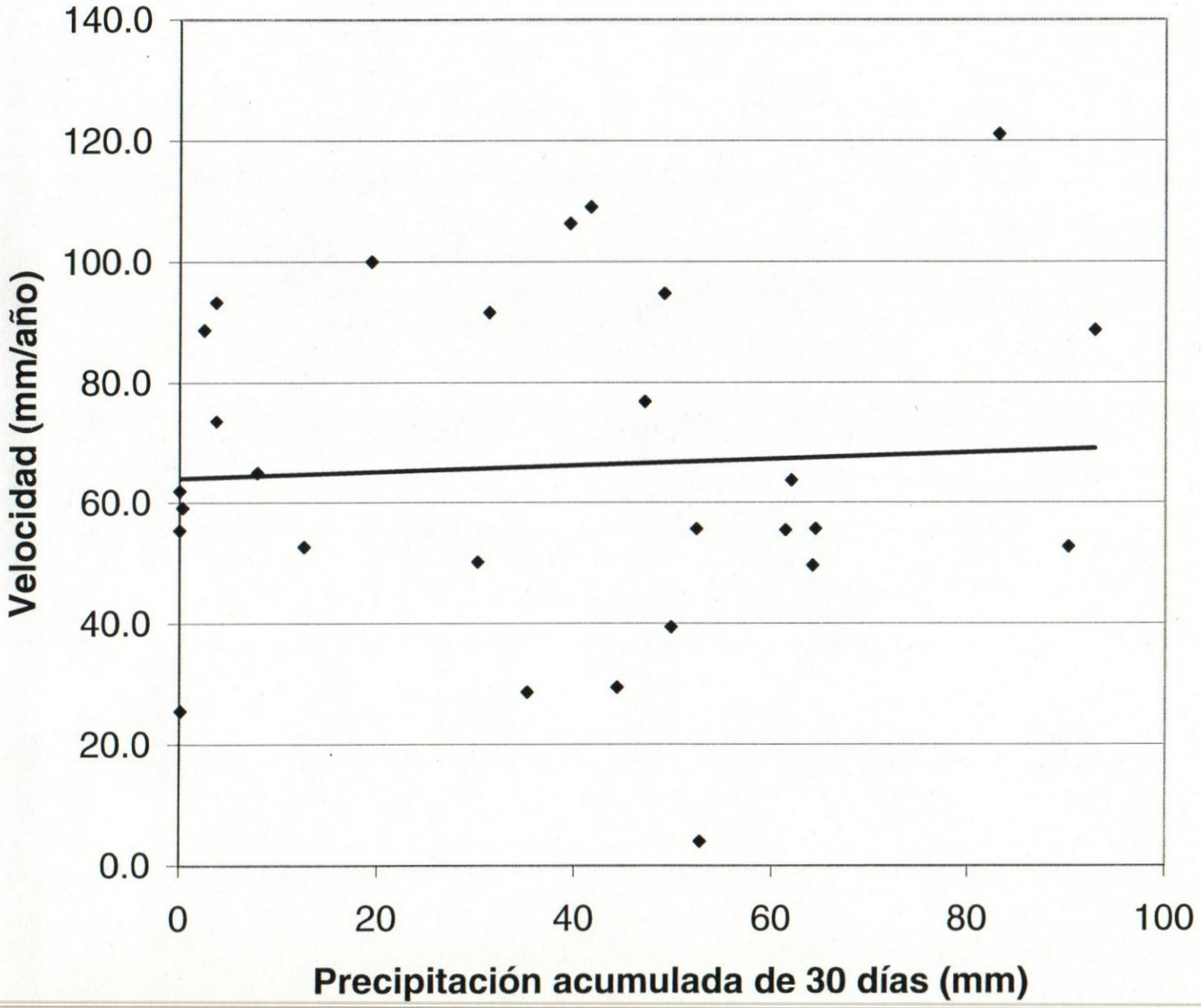
Inclinómetro IC-15



$y = -0.2125x + 69.787$

$R^2 = 0.0198$

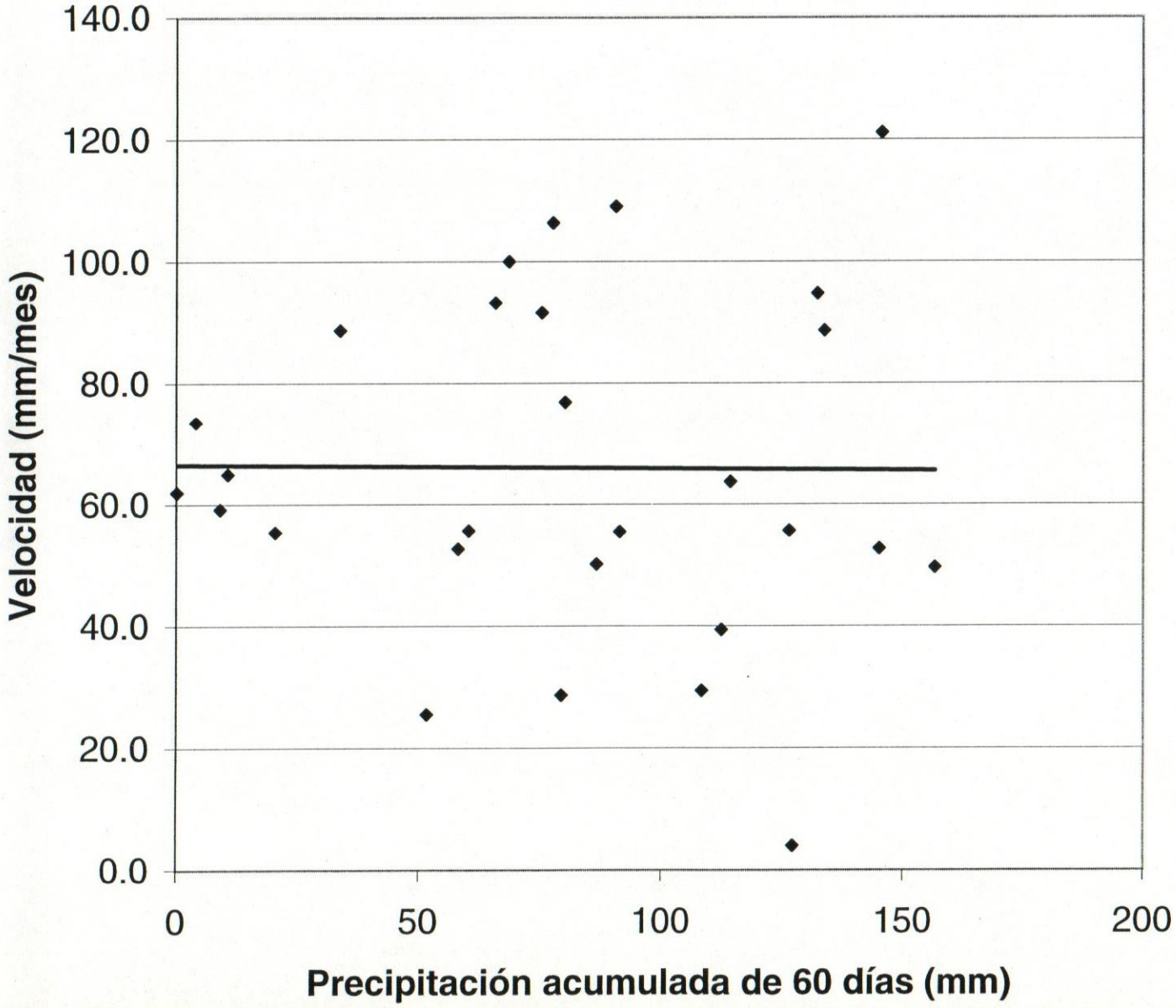
Inclinómetro IC-15



$y = 0.0531x + 64.042$

$R^2 = 0.003$

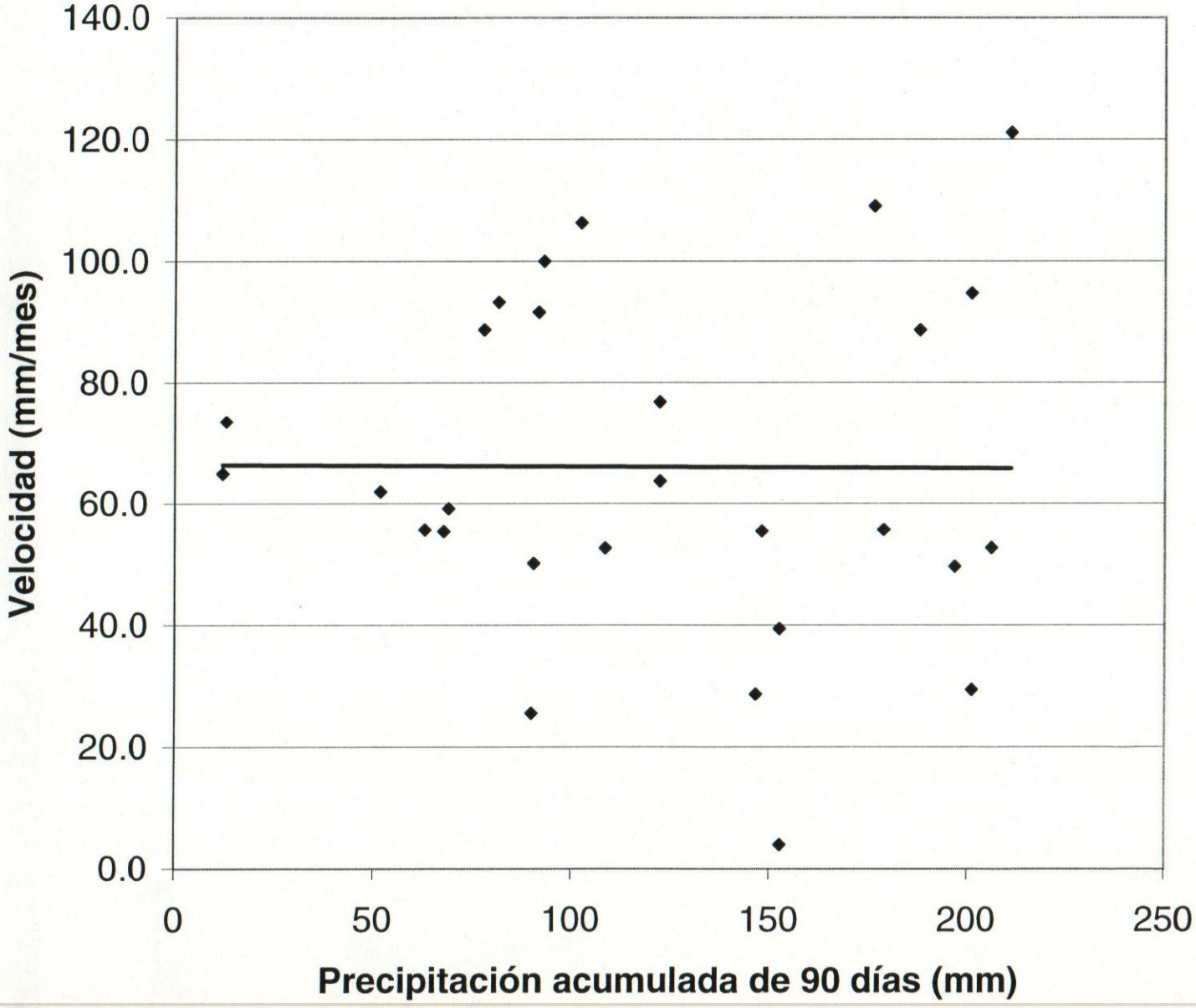
Inclinómetro IC-15



$y = -0.0062x + 66.519$

$R^2 = 0.0001$

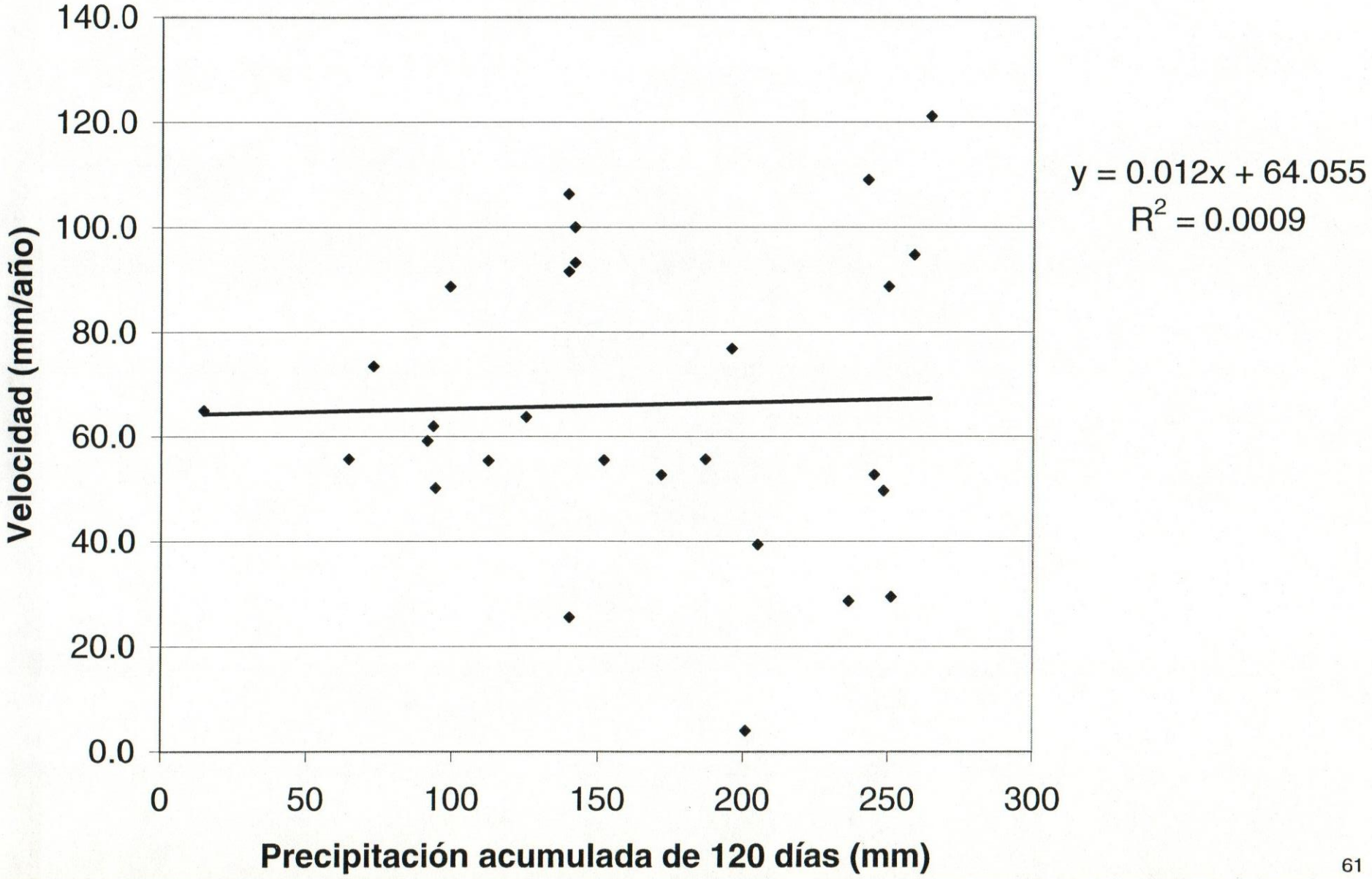
Inclinómetro IC-15



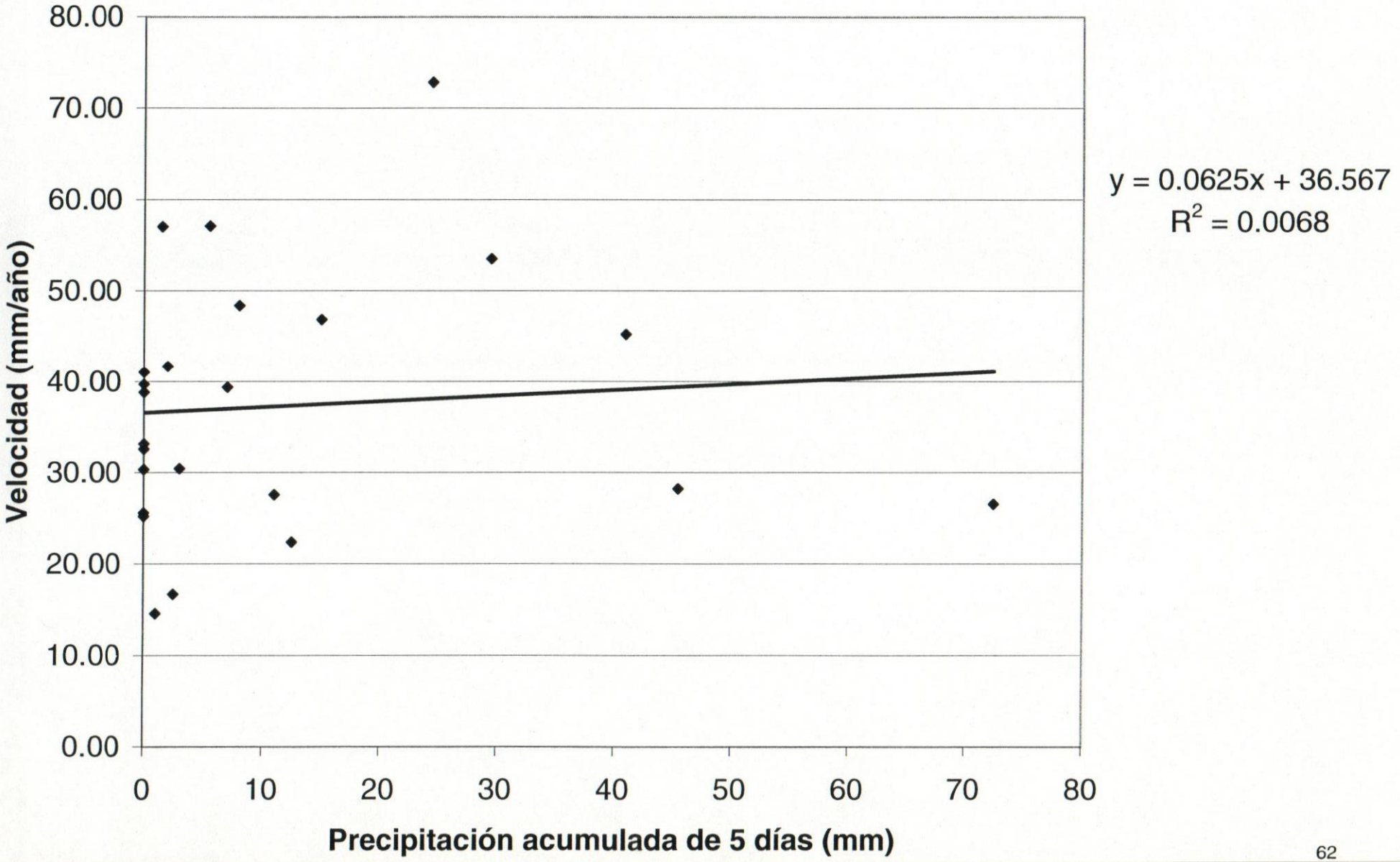
$y = -0.0028x + 66.356$

$R^2 = 3E\text{-}05$

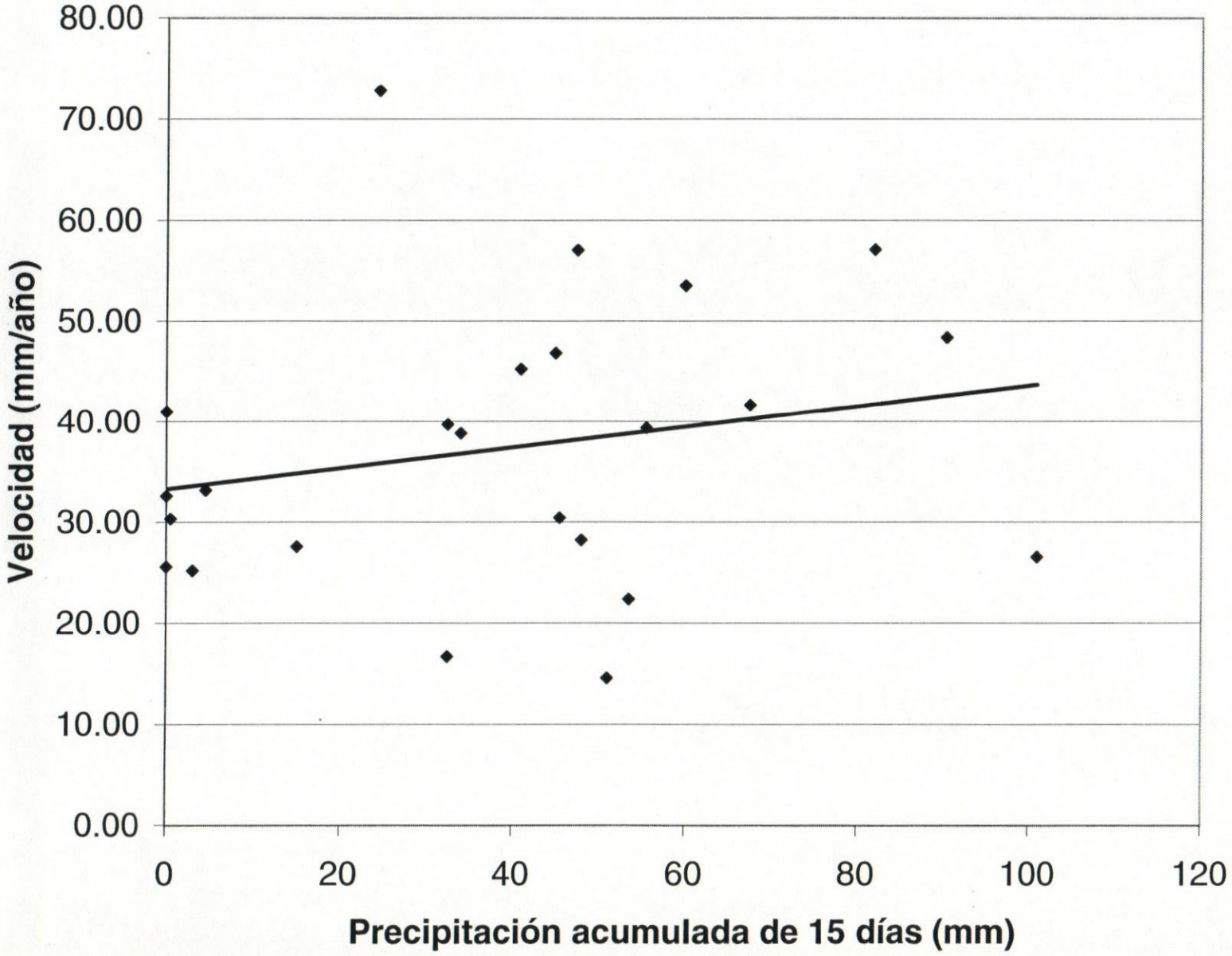
Inclinómetro IC-15



Inclinómetro IC-16



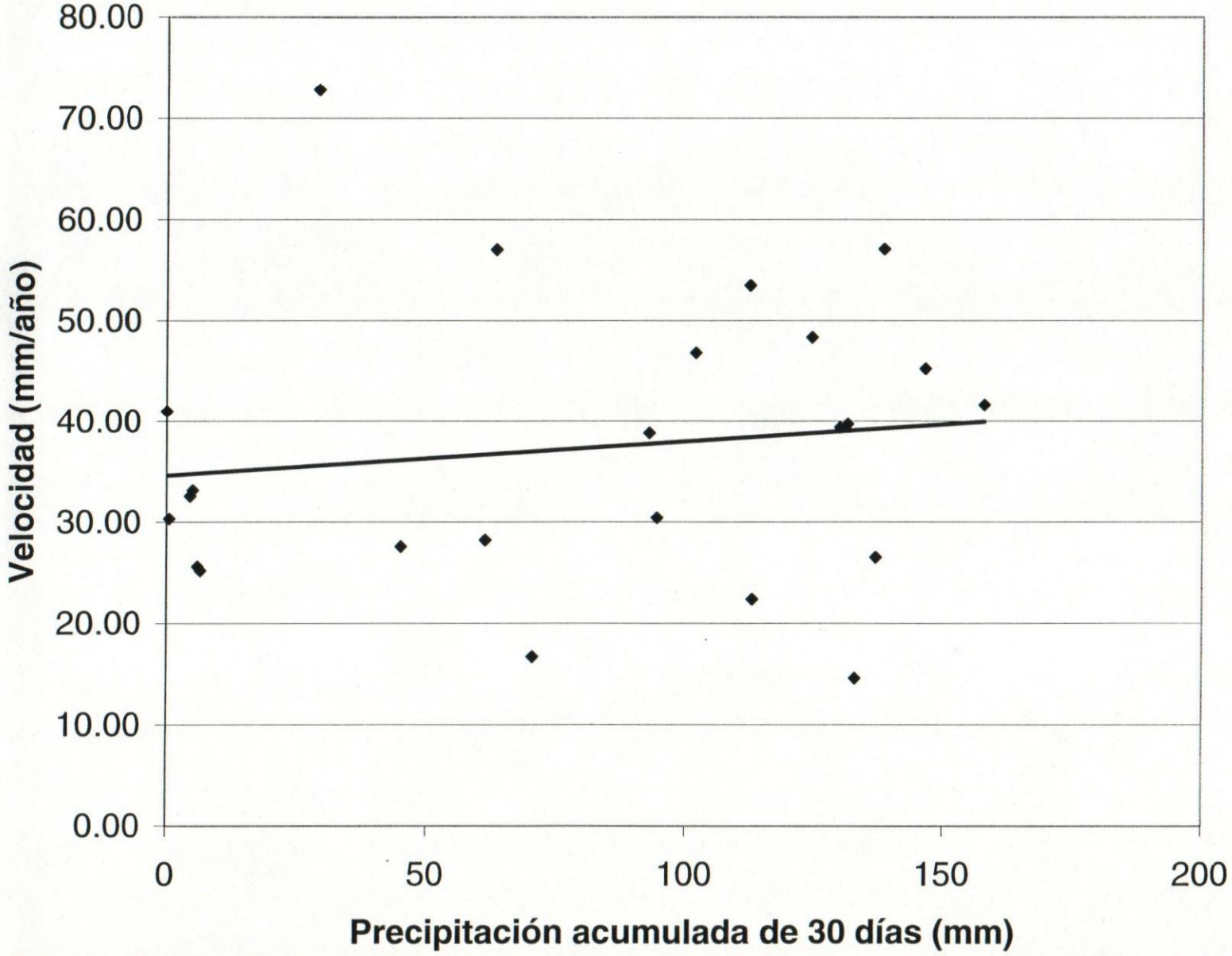
Inclinómetro IC-16



$y = 0.1032x + 33.284$

$R^2 = 0.047$

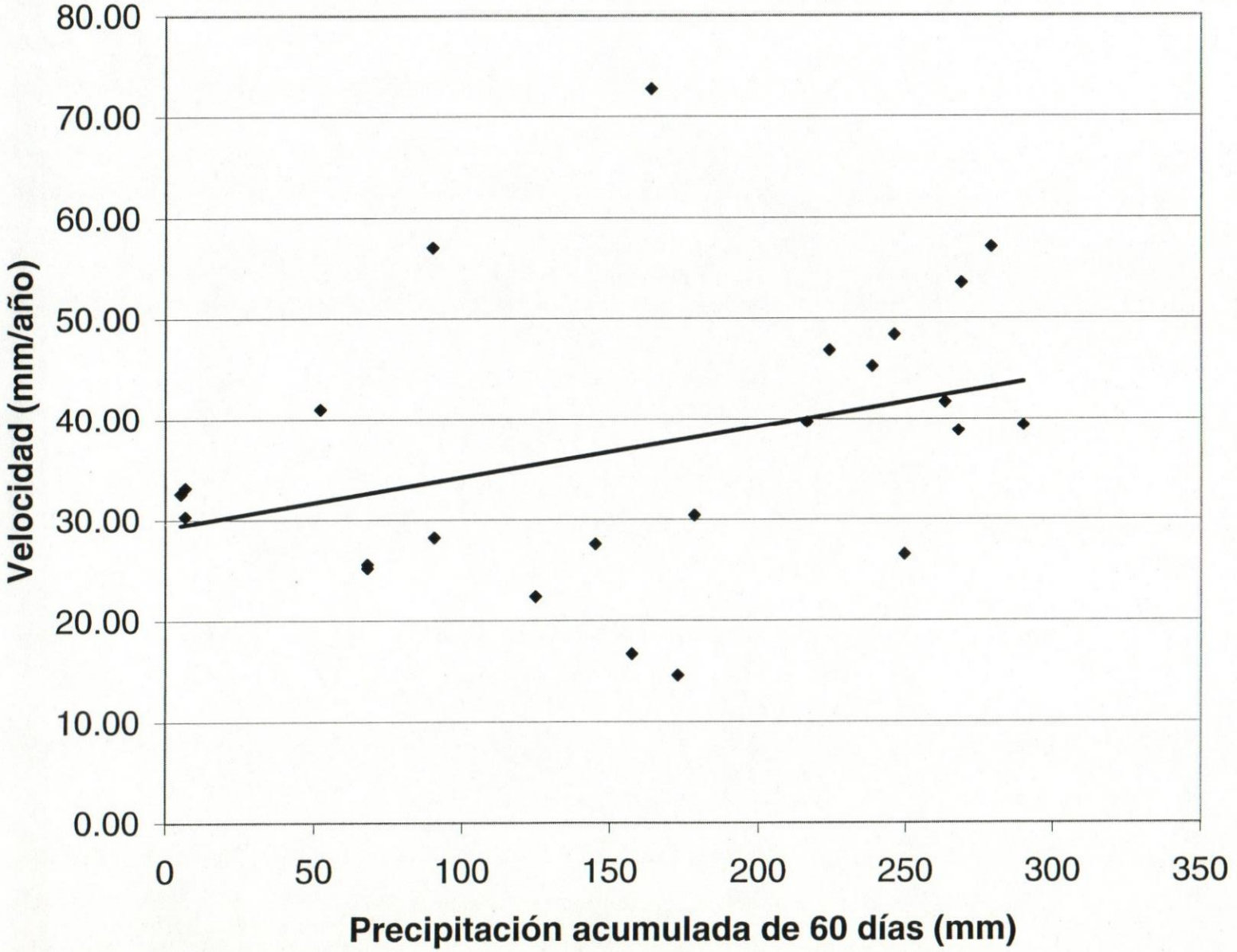
Inclinómetro IC-16



$y = 0.0337x + 34.626$

$R^2 = 0.0175$

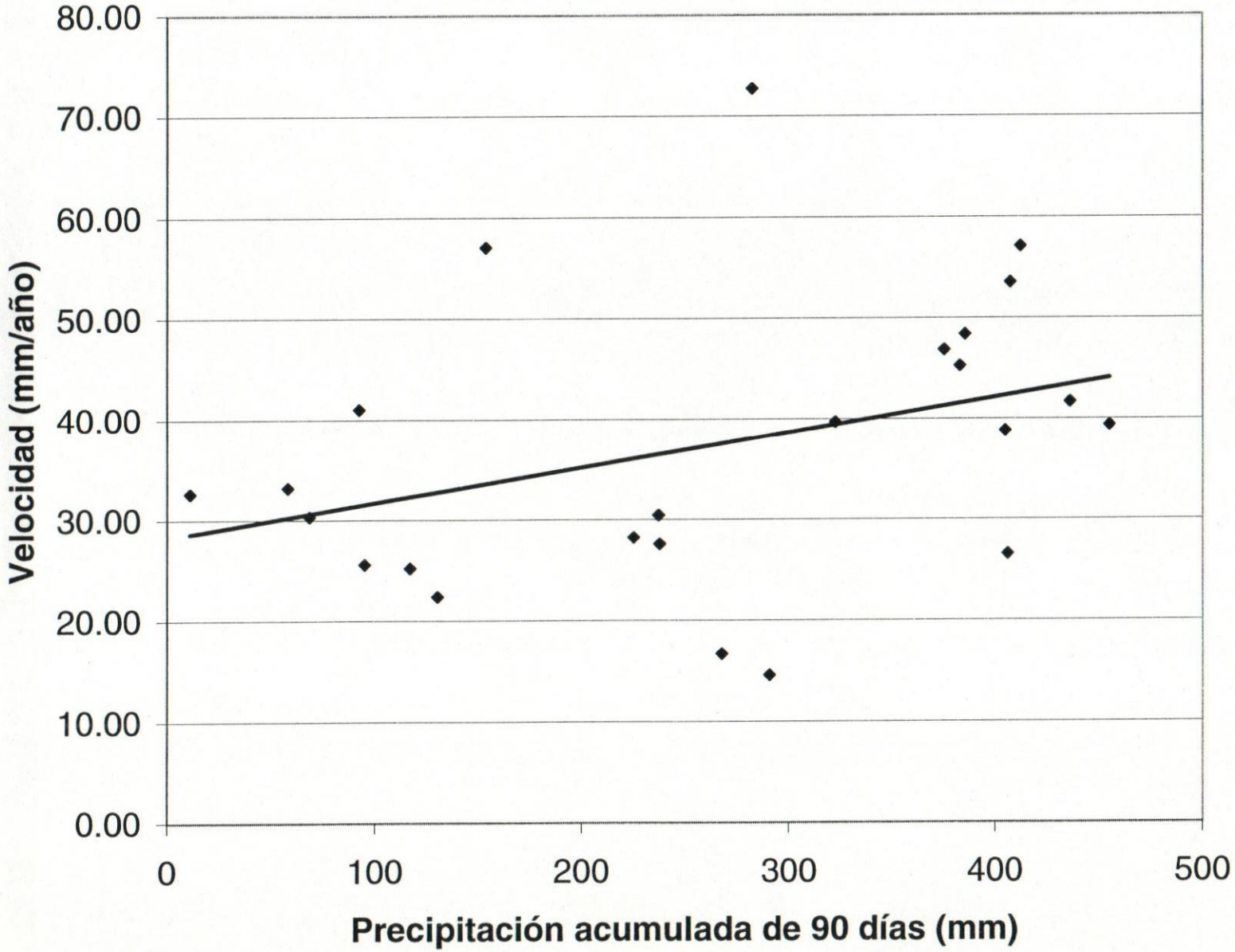
Inclinómetro IC-16



$y = 0.05x + 29.227$

$R^2 = 0.1142$

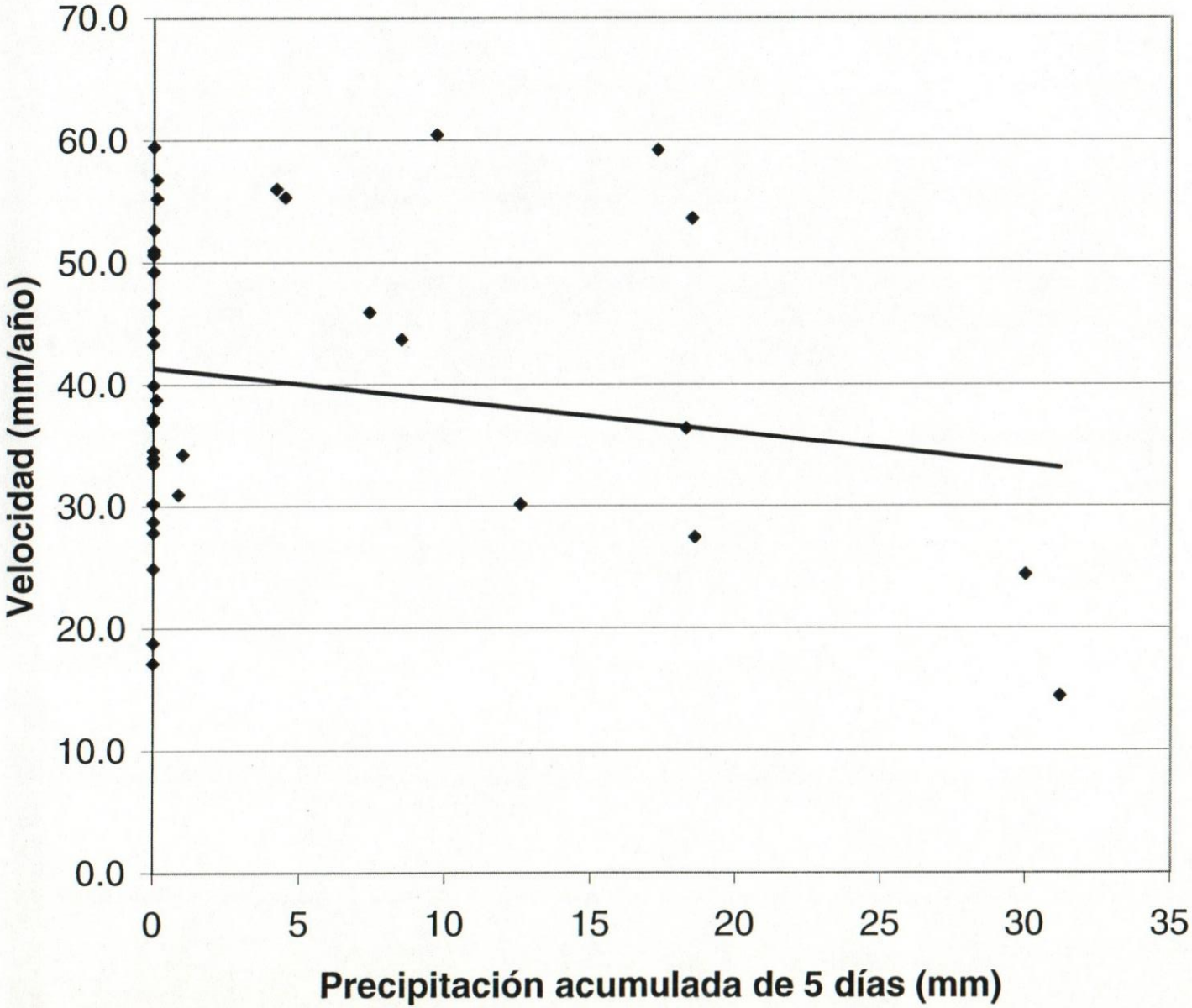
Inclinómetro IC-16



$y = 0.0348x + 28.238$

$R^2 = 0.1212$

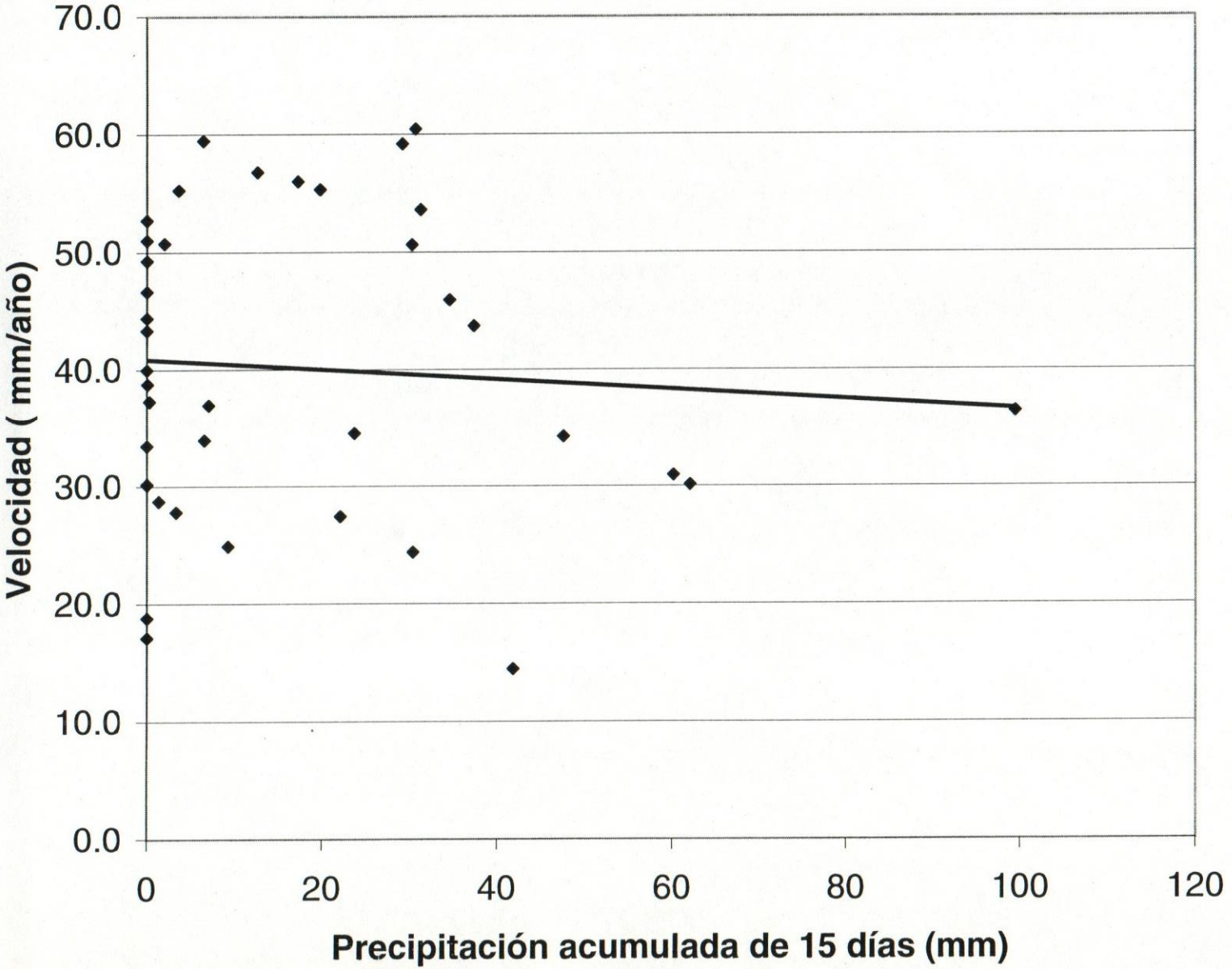
Inclinómetro IC-17



$y = -0.2649x + 41.392$

$R^2 = 0.0314$

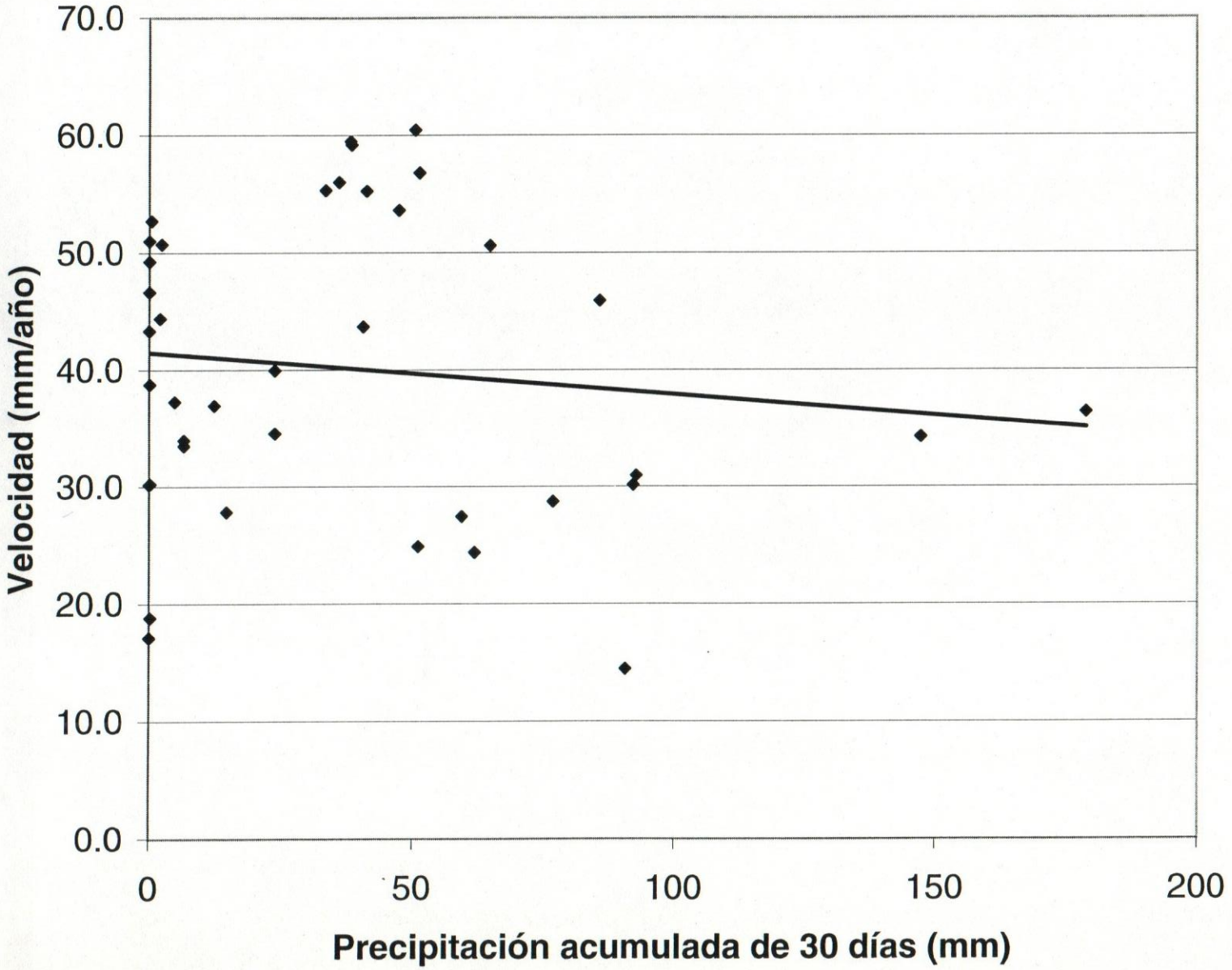
Inclinómetro IC-17



$y = -0.0423x + 40.876$

$R^2 = 0.0056$

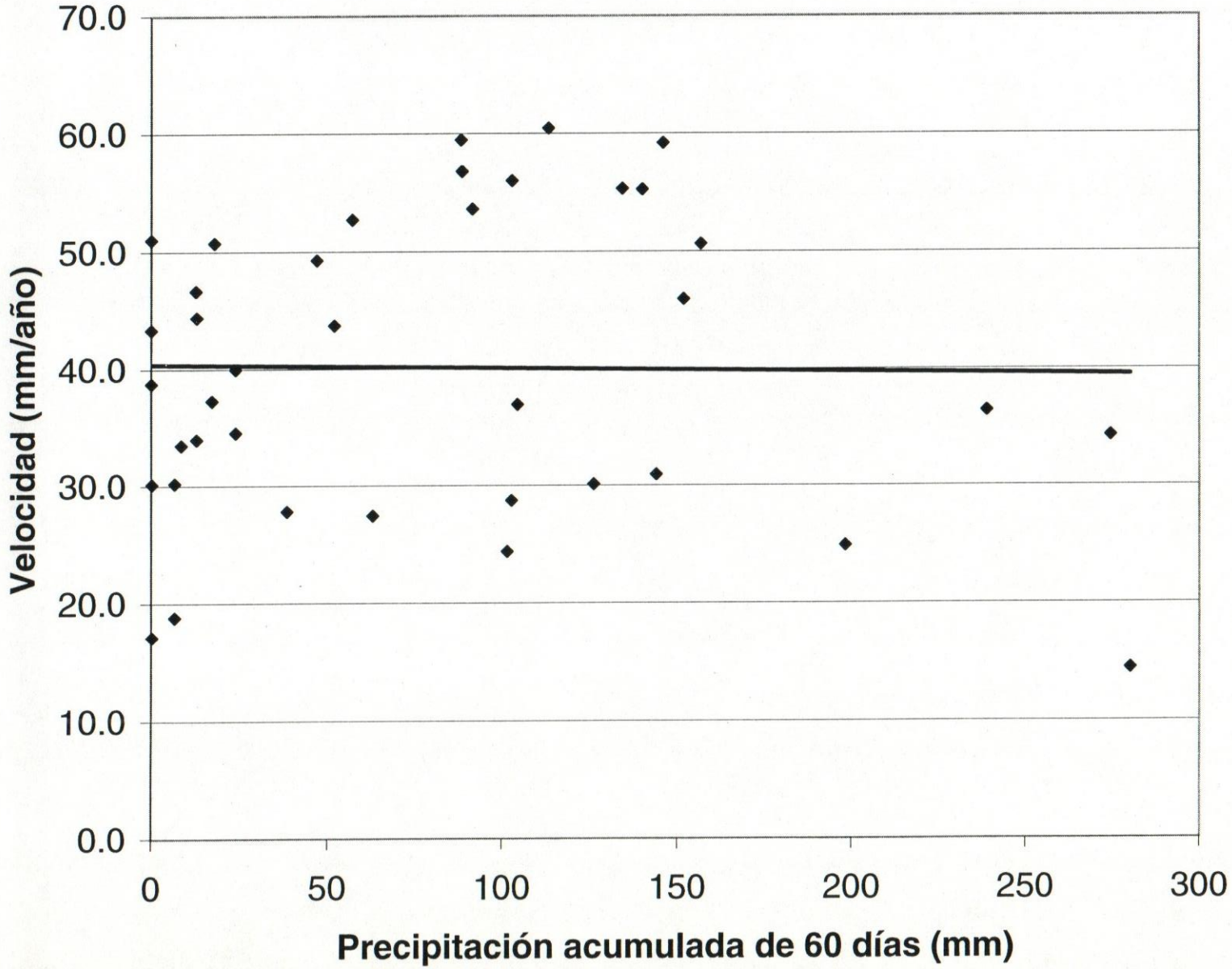
Inclinómetro IC-17



$y = -0.0356x + 41.497$

$R^2 = 0.0141$

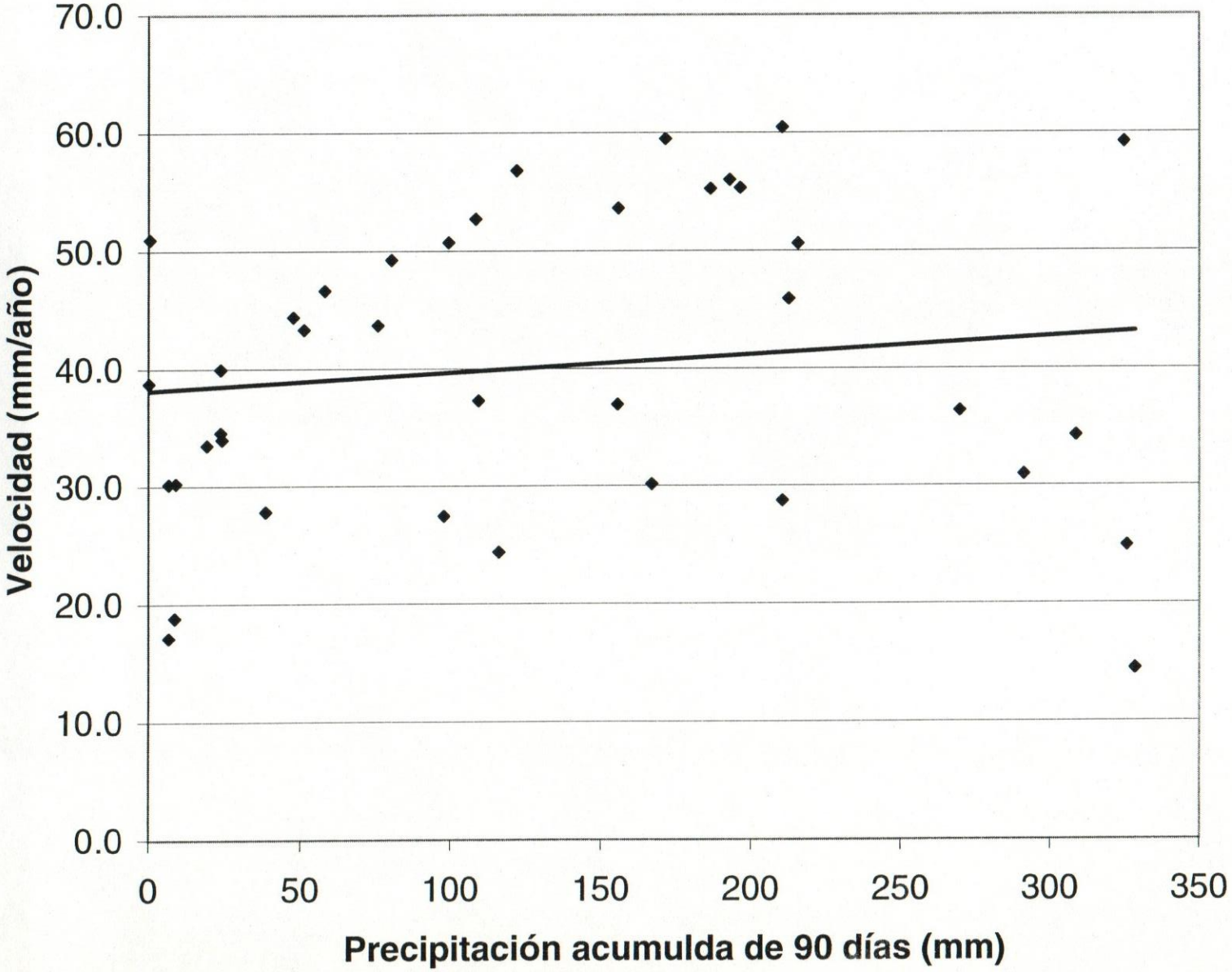
Inclinómetro IC-17



$y = -0.0032x + 40.41$

$R^2 = 0.0004$

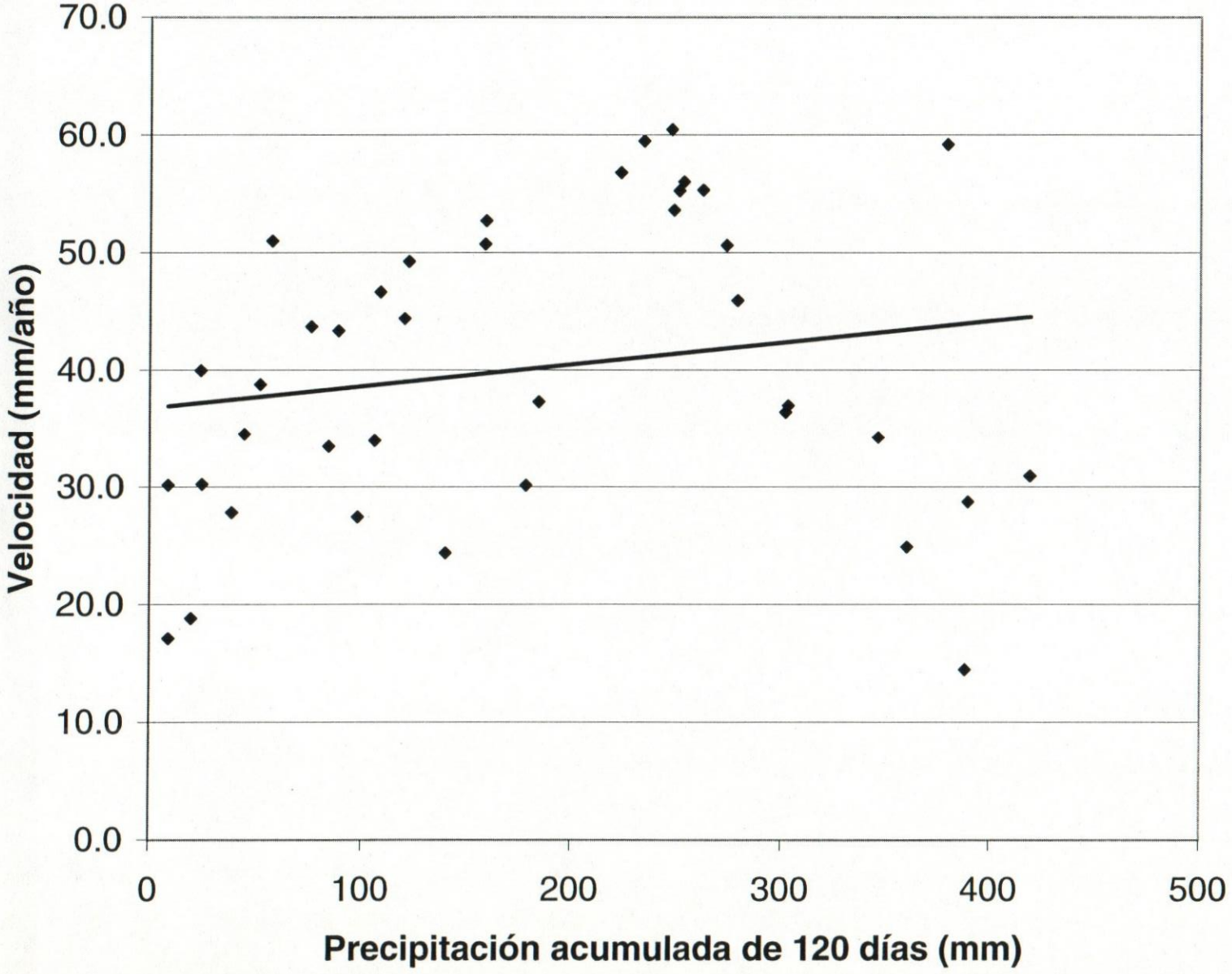
Inclinómetro IC-17



$y = 0.0152x + 38.183$

$R^2 = 0.0154$

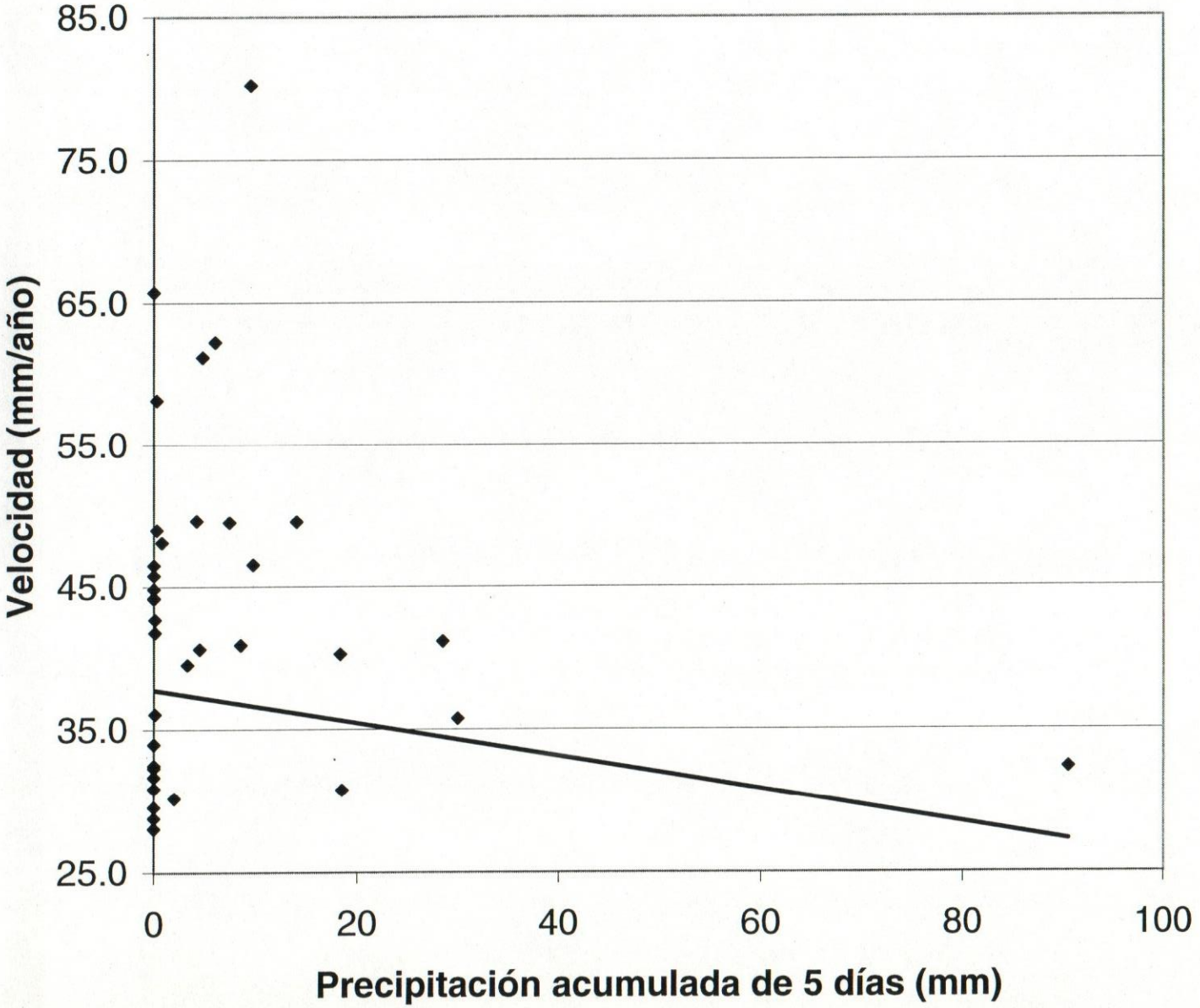
Inclinómetro IC-17



$y = 0.0185x + 36.793$

$R^2 = 0.0324$

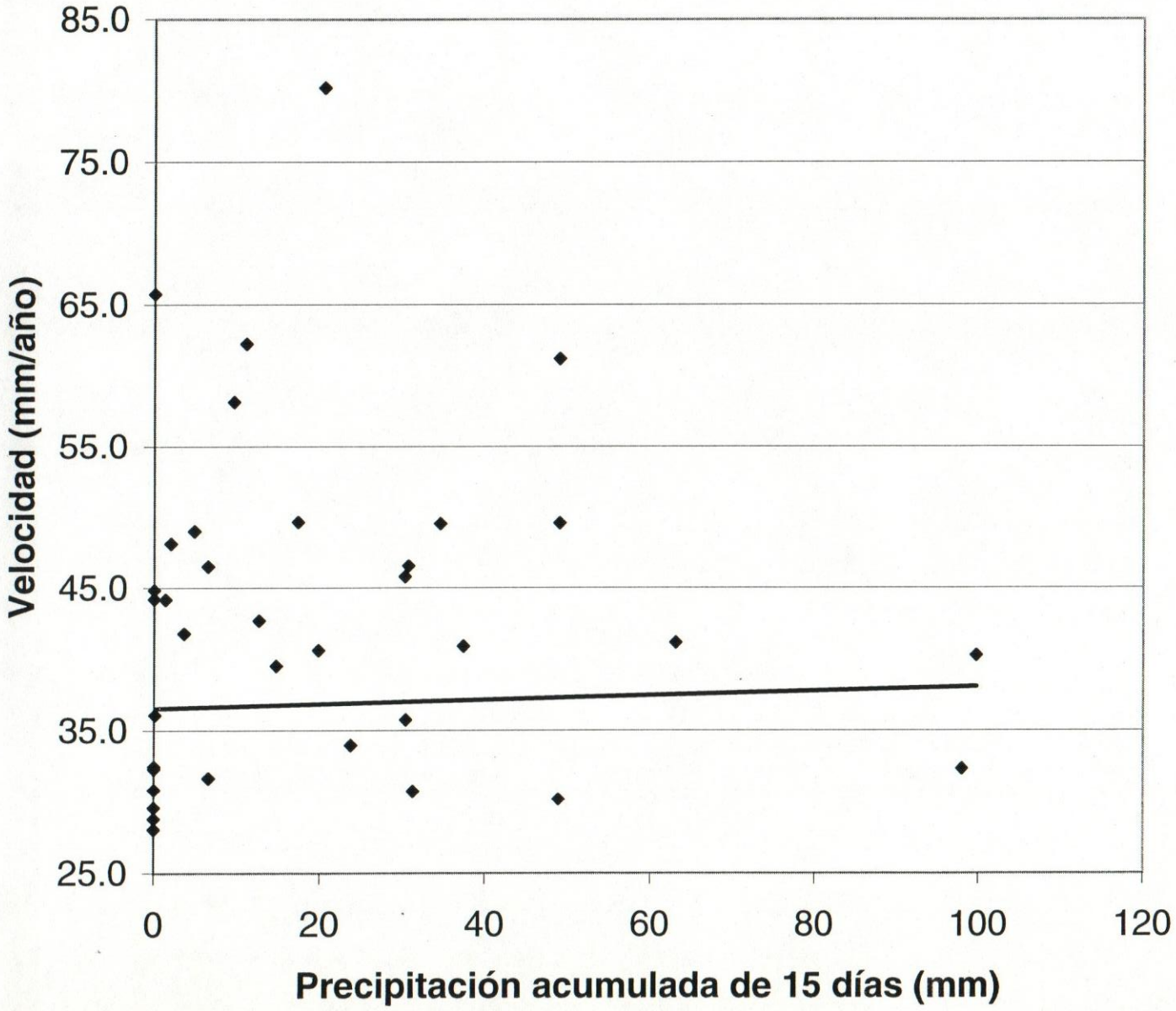
Inclinómetro IC-19



$y = -0.1164x + 37.772$

$R^2 = 0.0132$

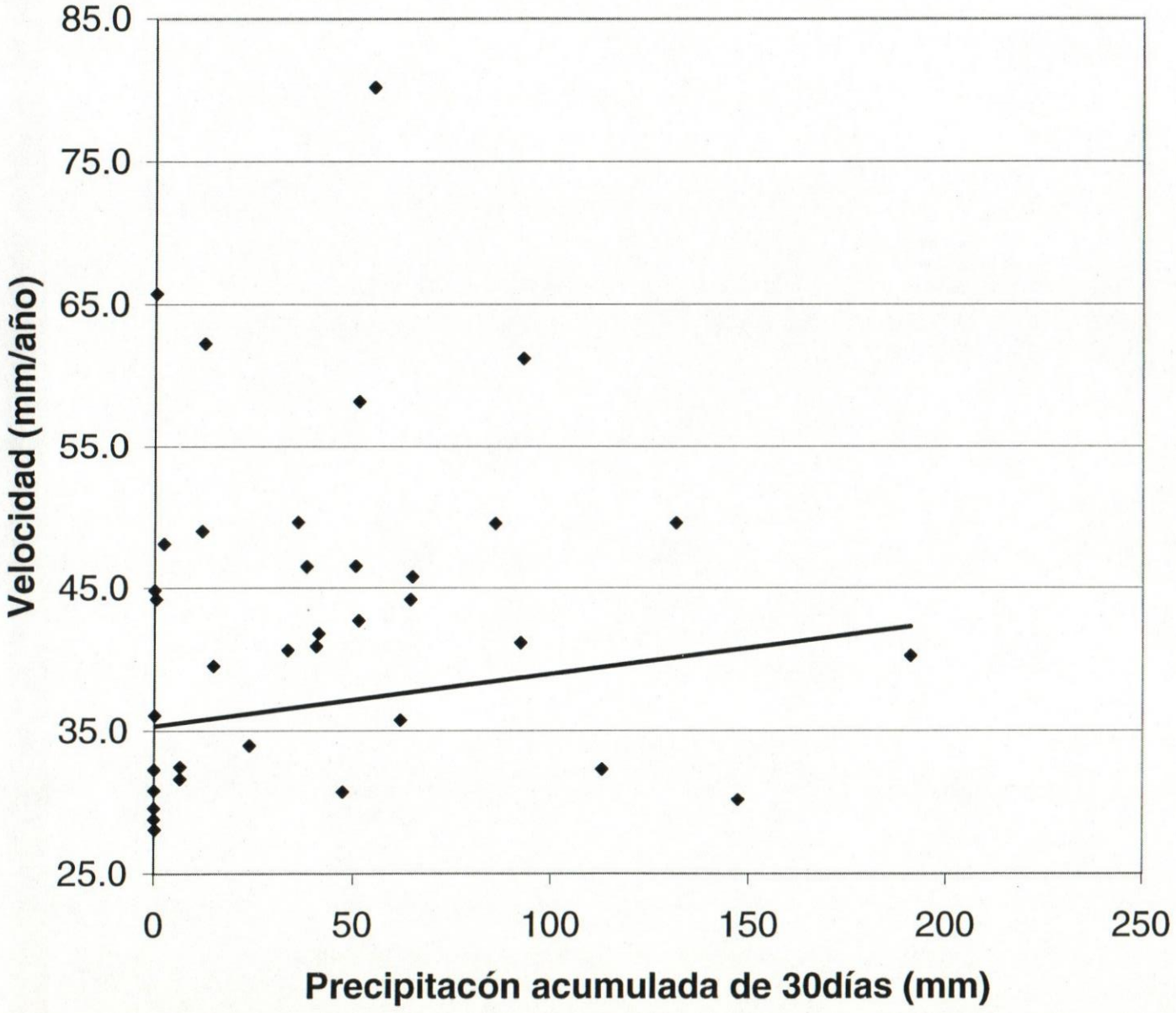
Inclinómetro IC-19



$y = 0.0154x + 36.552$

$R^2 = 0.0006$

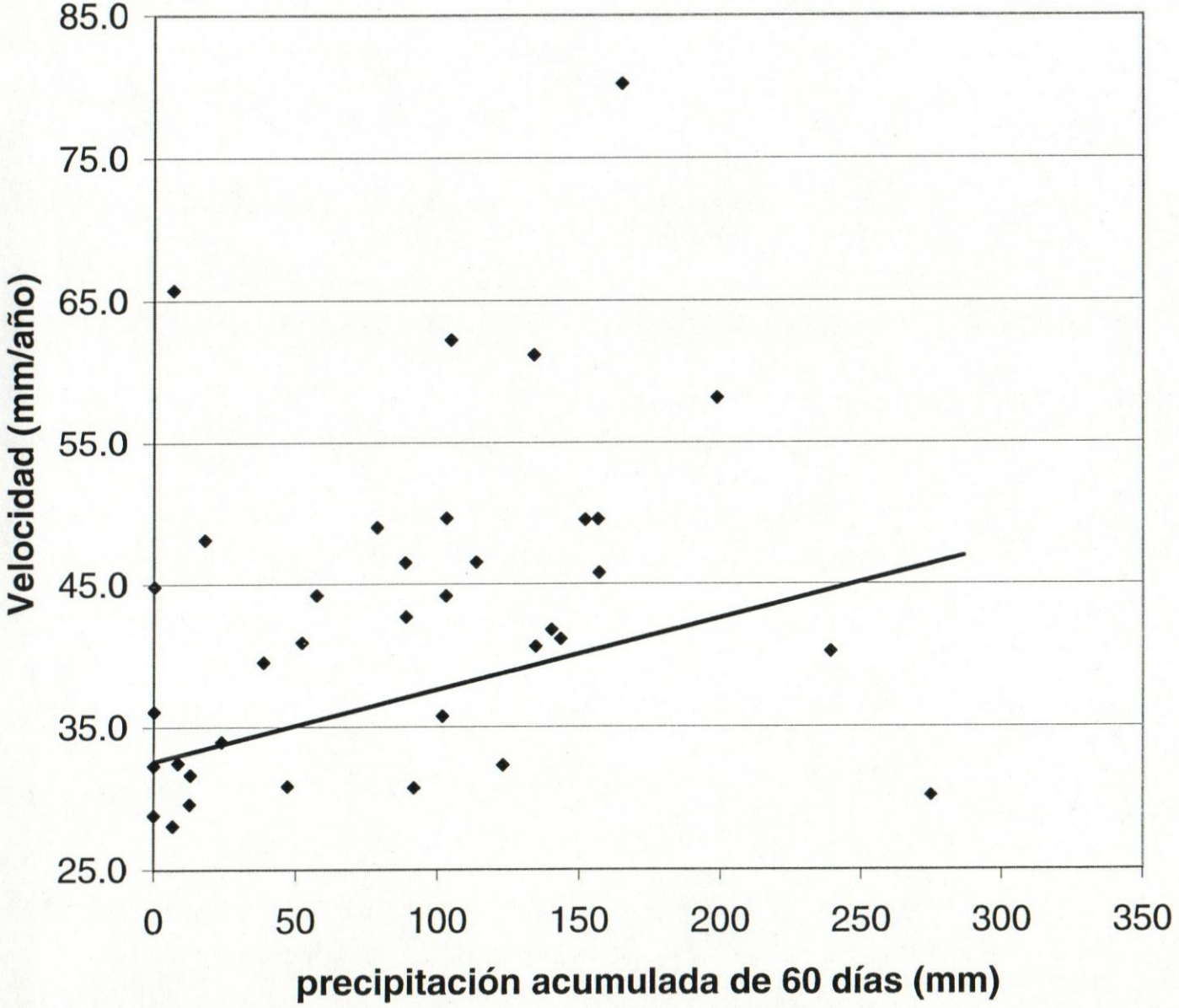
Inclinómetro IC-19



$y = 0.0365x + 35.335$

$R^2 = 0.0112$

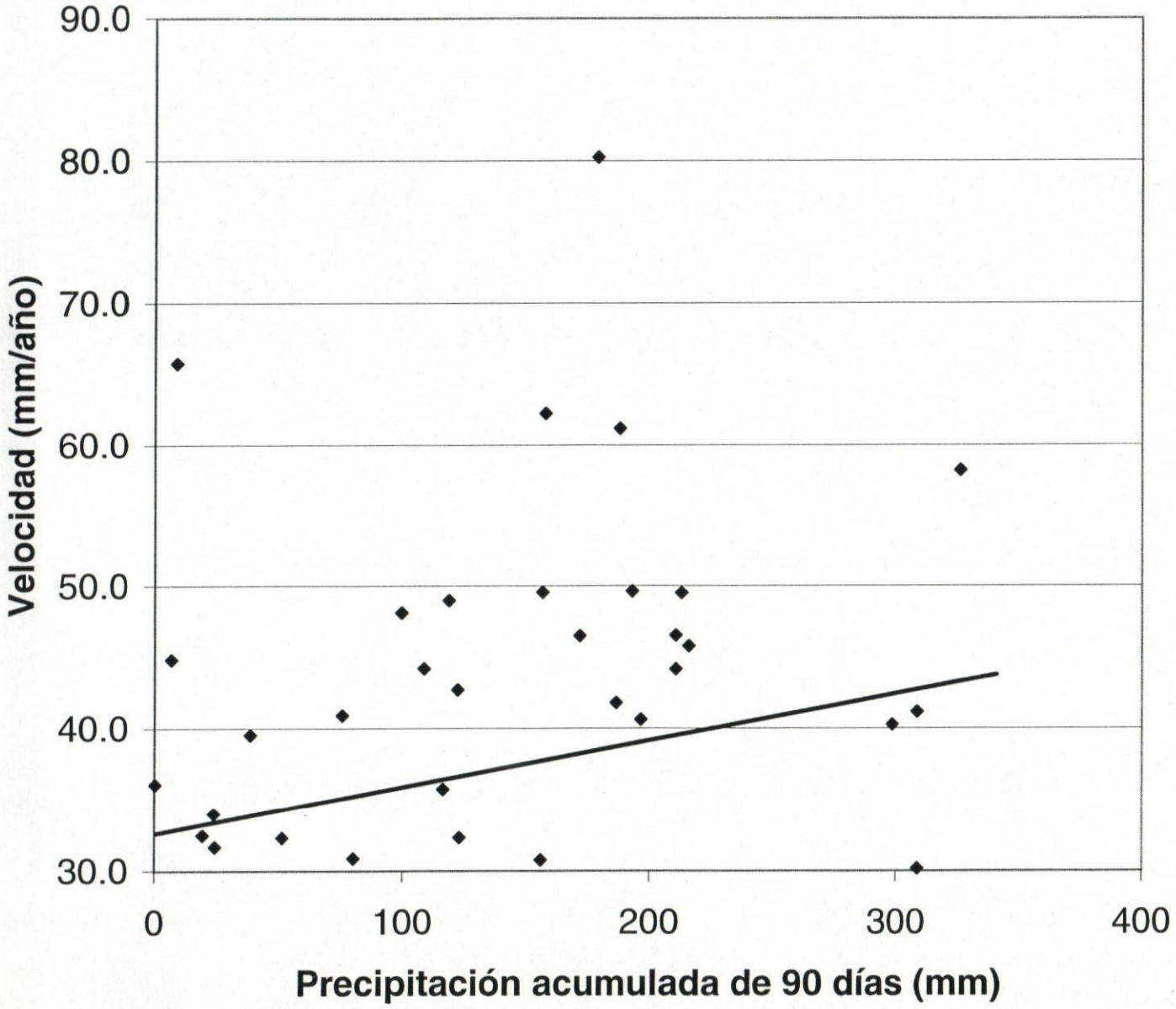
Inclinómetro IC-19



$y = 0.0501x + 32.613$

$R^2 = 0.058$

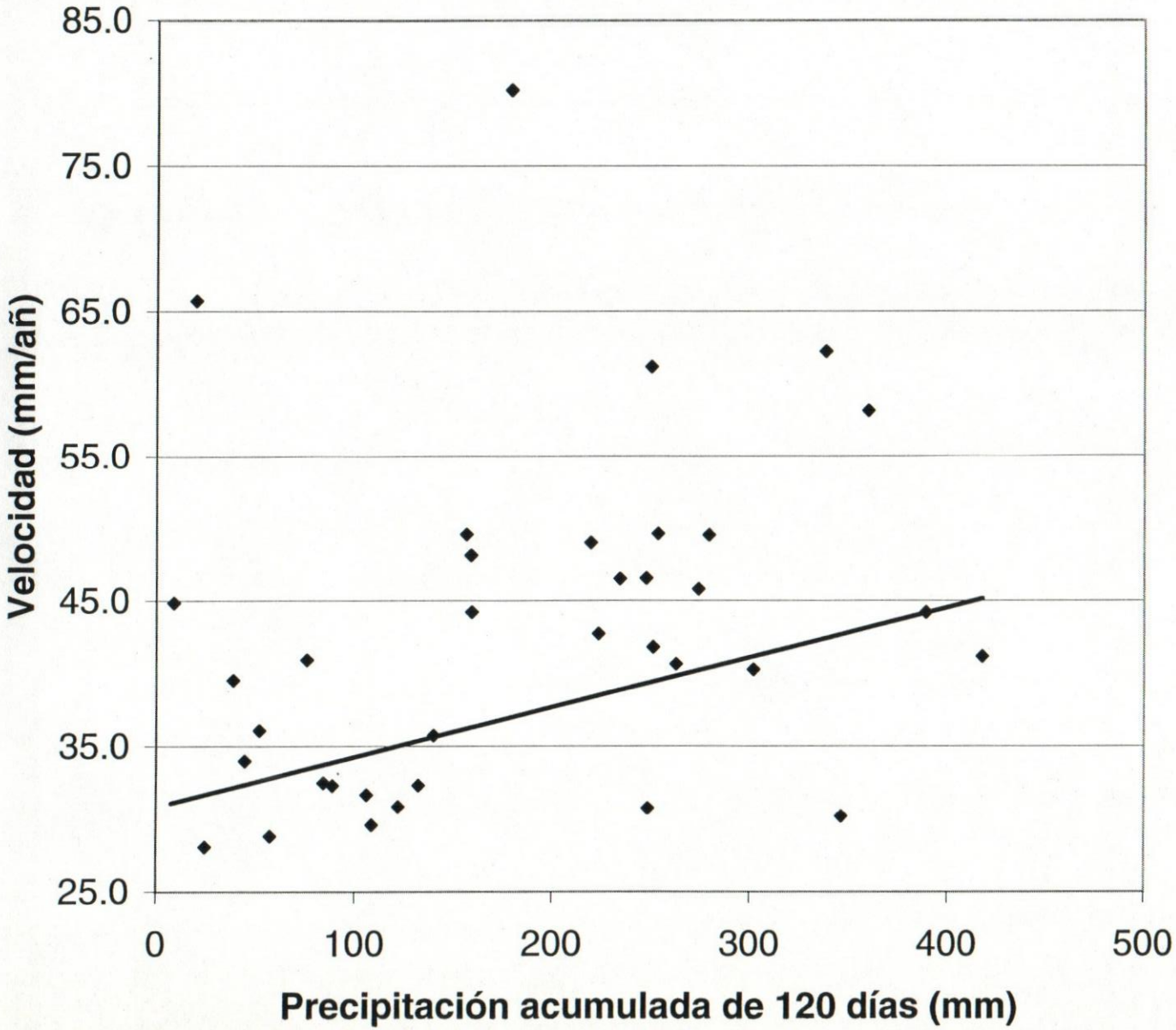
Inclinómetro IC-19



$y = 0.0328x + 32.616$

$R^2 = 0.0443$

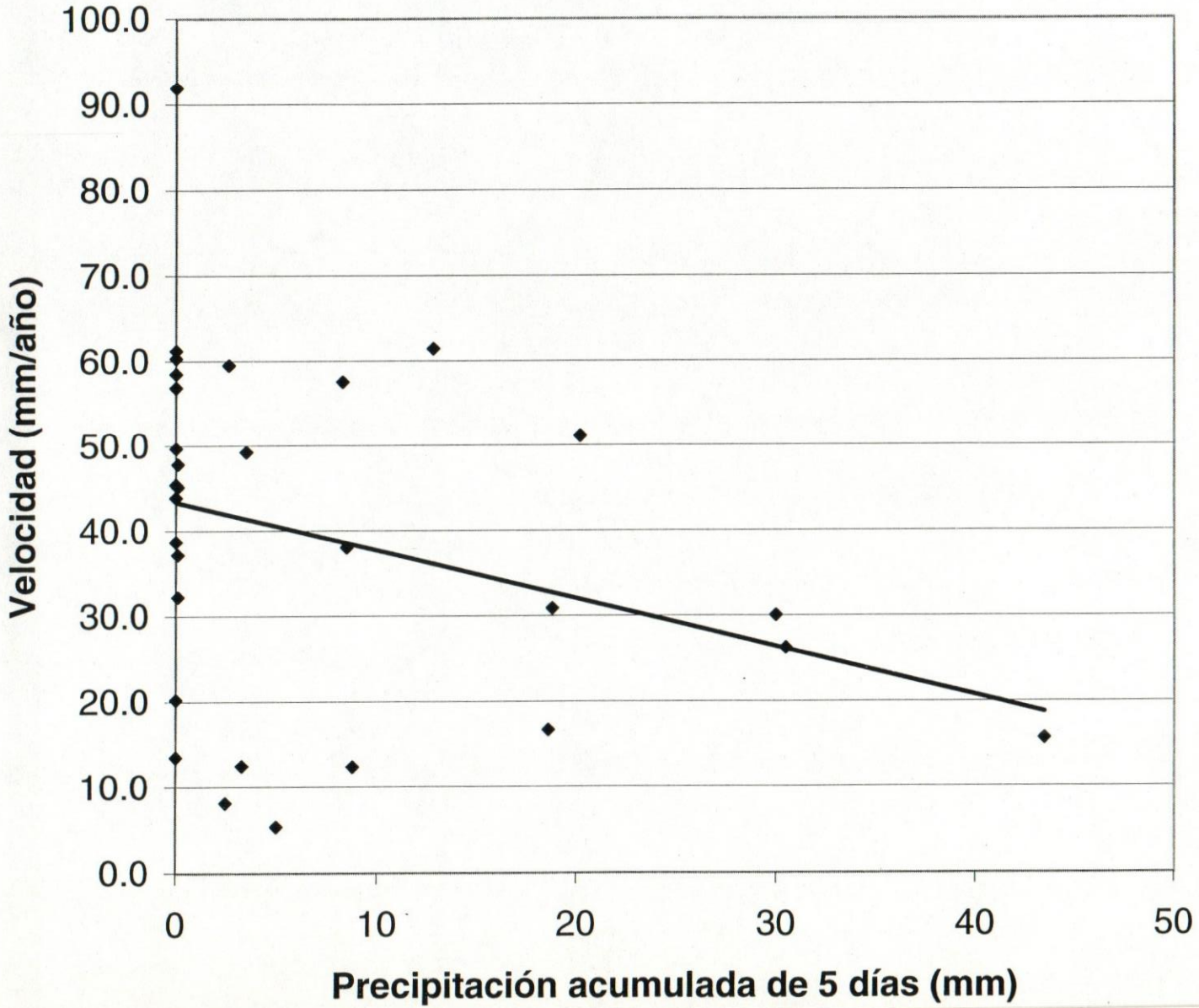
Inclinómetro IC-19



$y = 0.0342x + 30.844$

$R^2 = 0.0682$

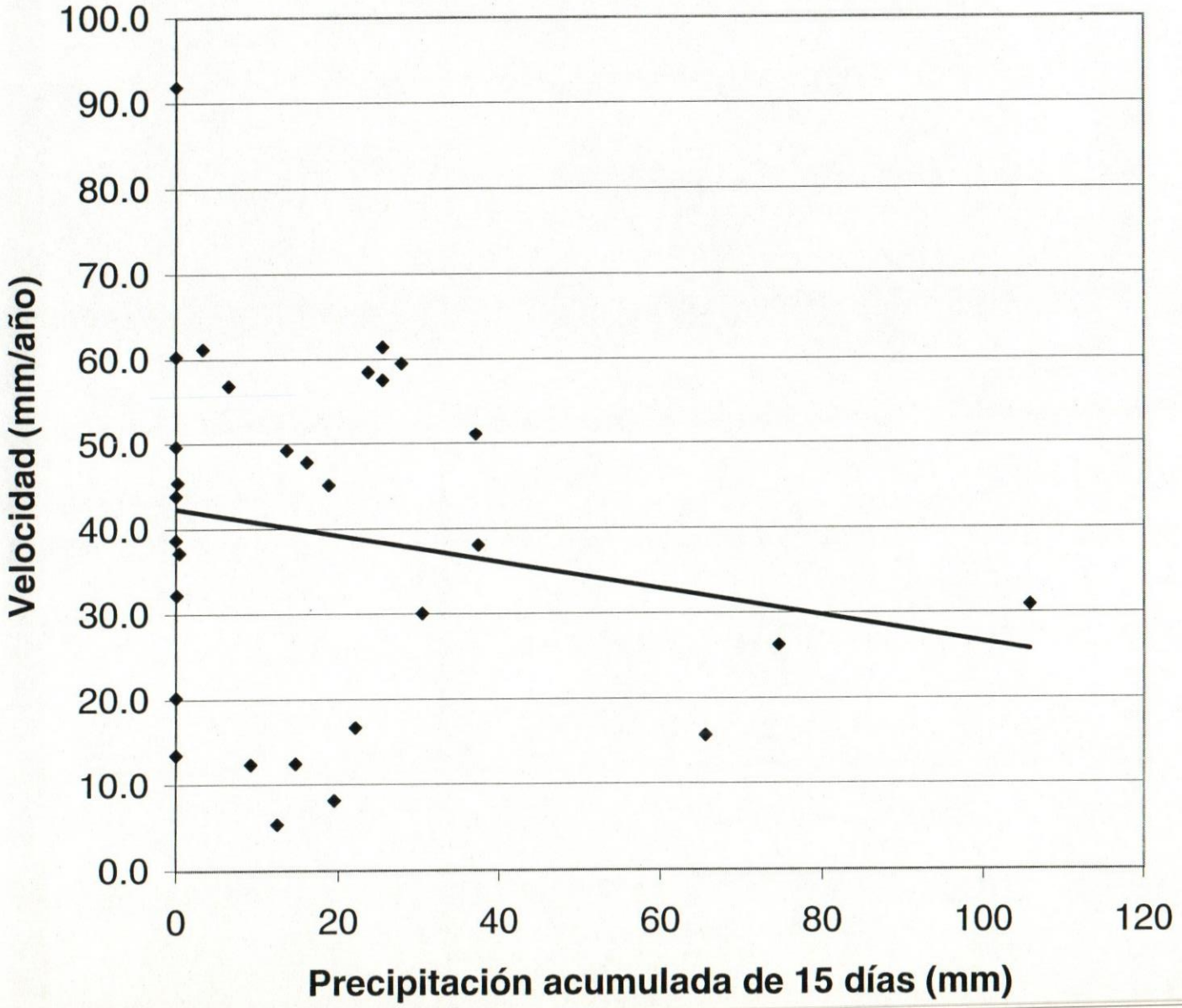
Inclinómetro IC-25



$y = -0.5651x + 43.367$

$R^2 = 0.0973$

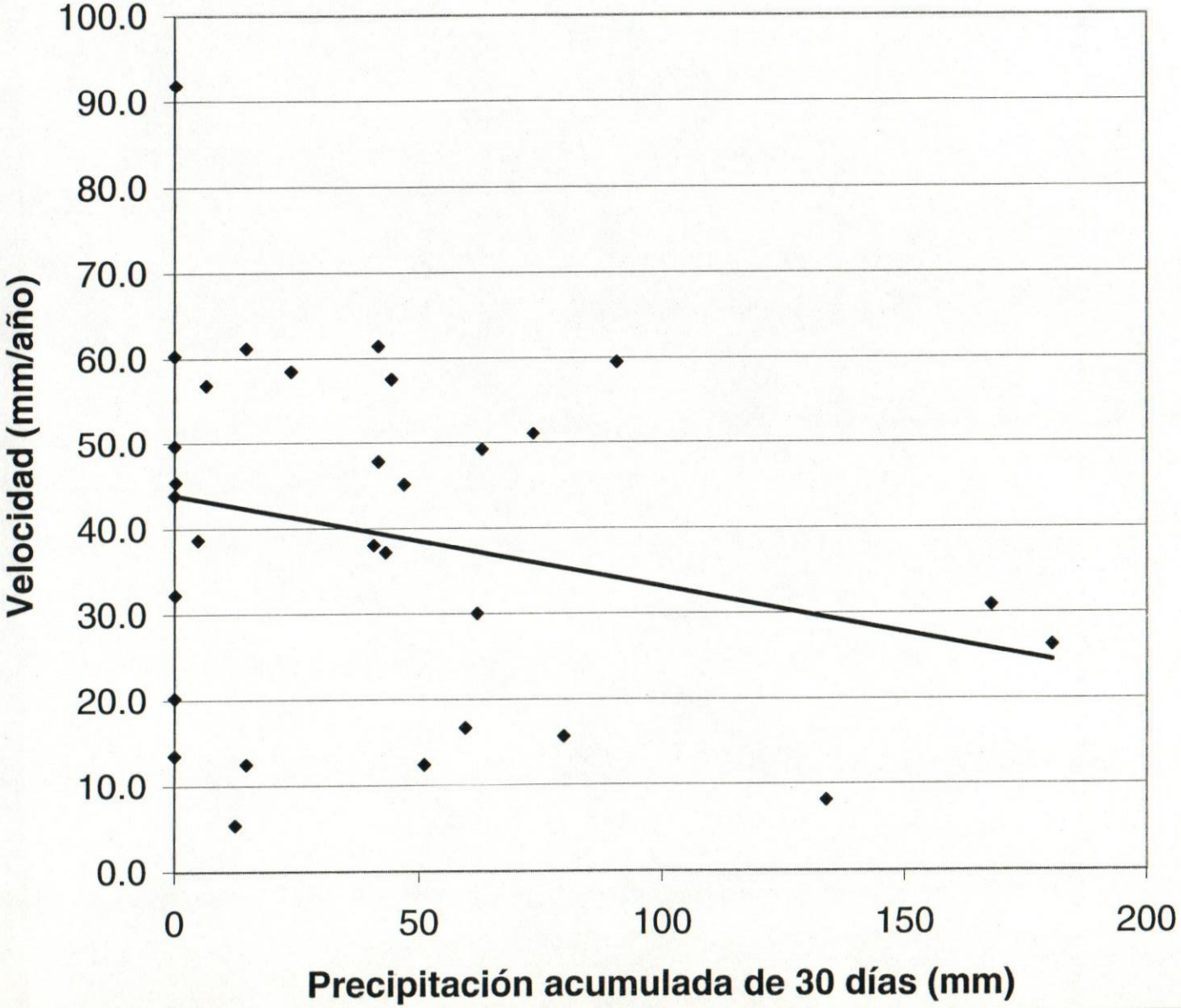
Inclinómetro IC-25



$y = -0.1575x + 42.373$

$R^2 = 0.0367$

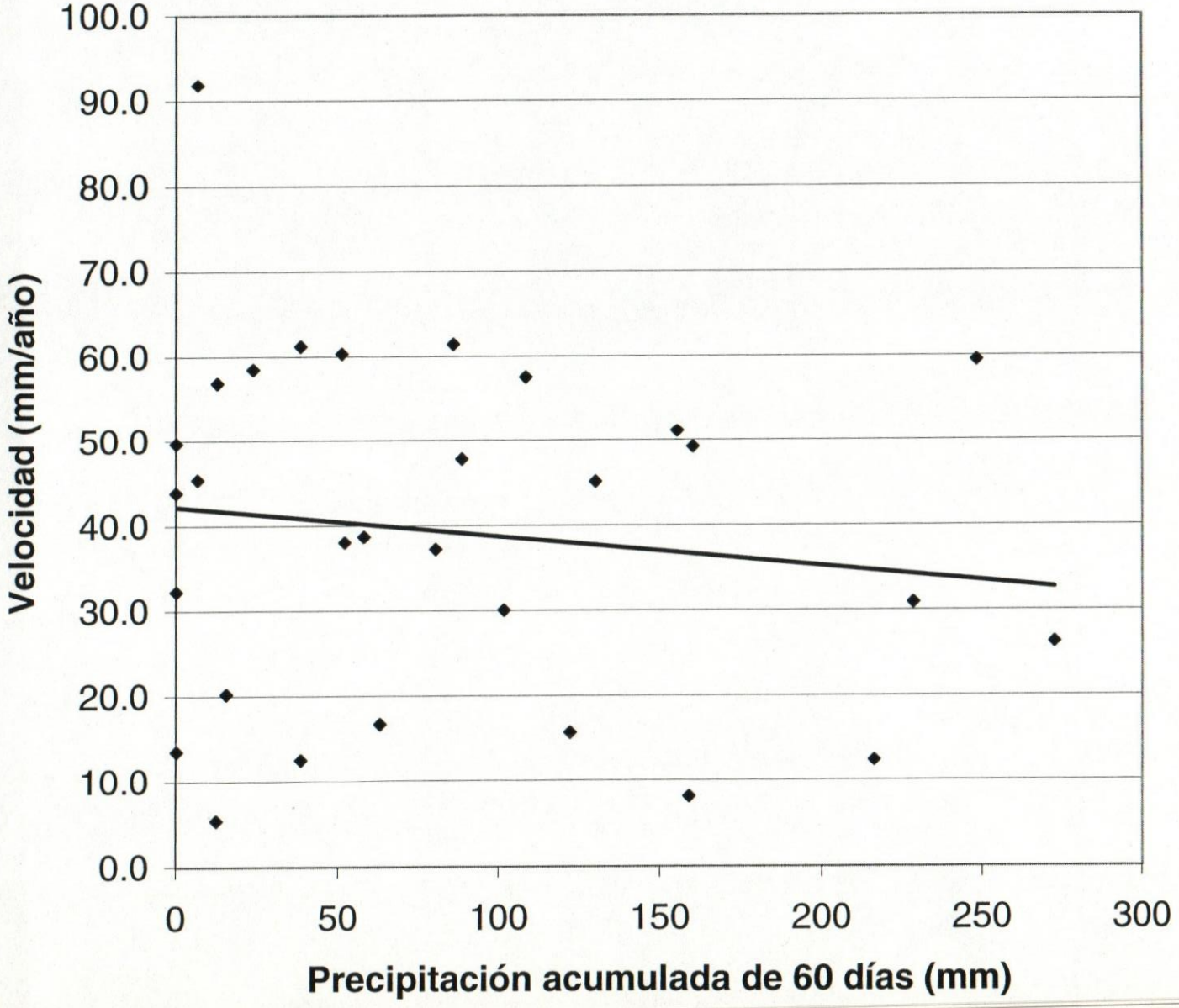
Inclinómetro IC-25



$y = -0.1078x + 43.938$

$R^2 = 0.066$

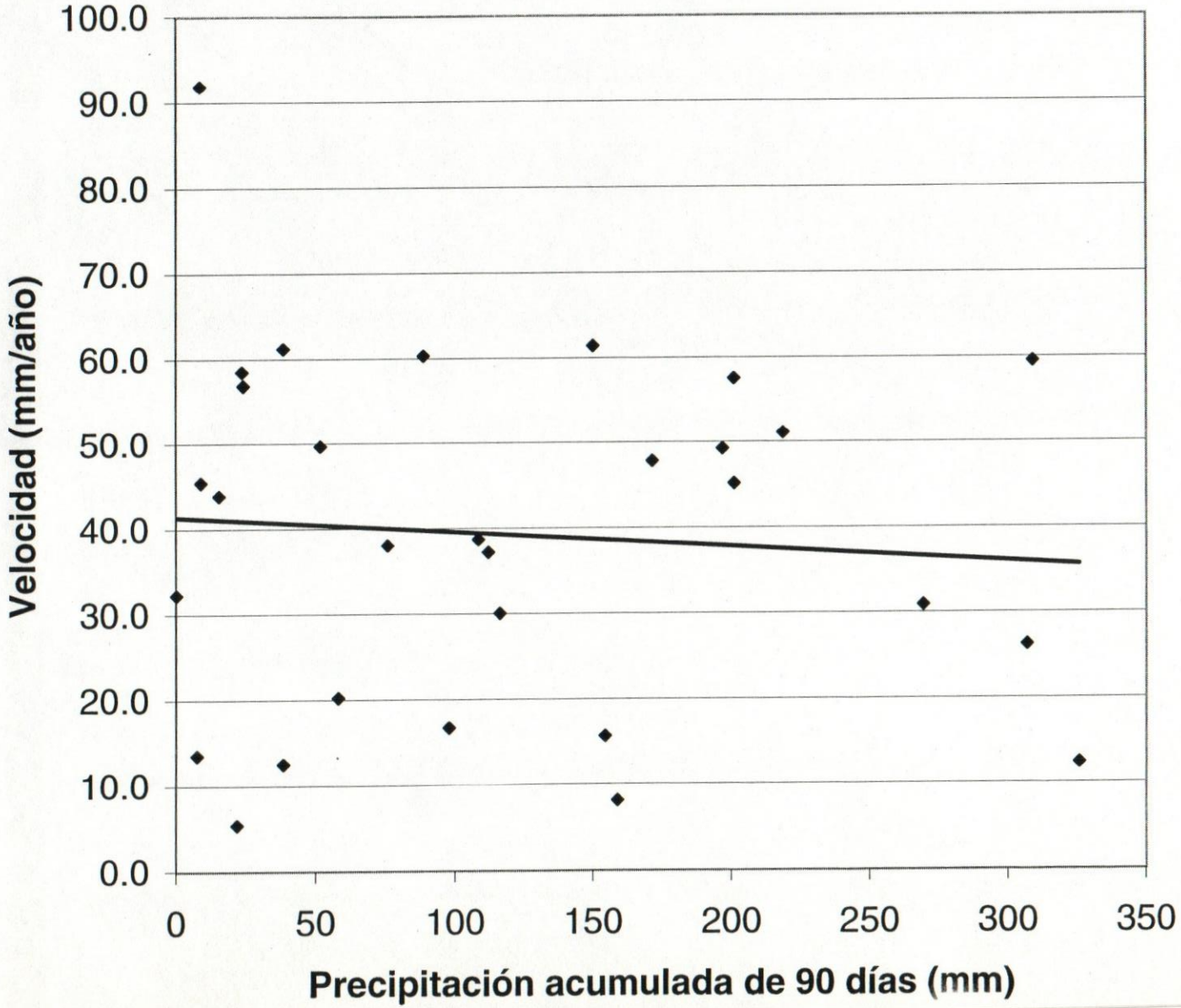
Inclinómetro IC-25



$y = -0.035x + 42.232$

$R^2 = 0.019$

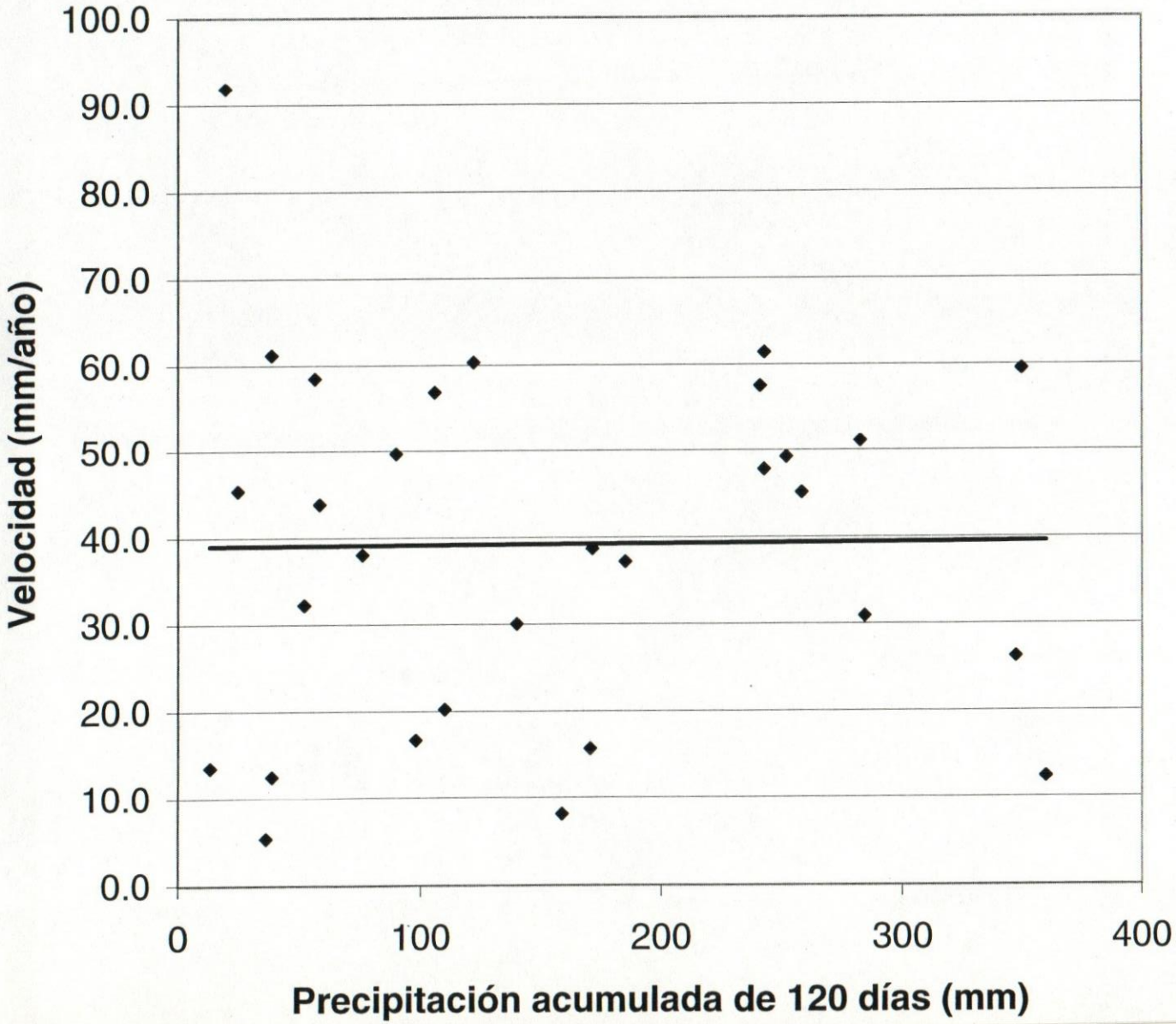
Inclinómetro IC-25



$y = -0.0178x + 41.386$

$R^2 = 0.0075$

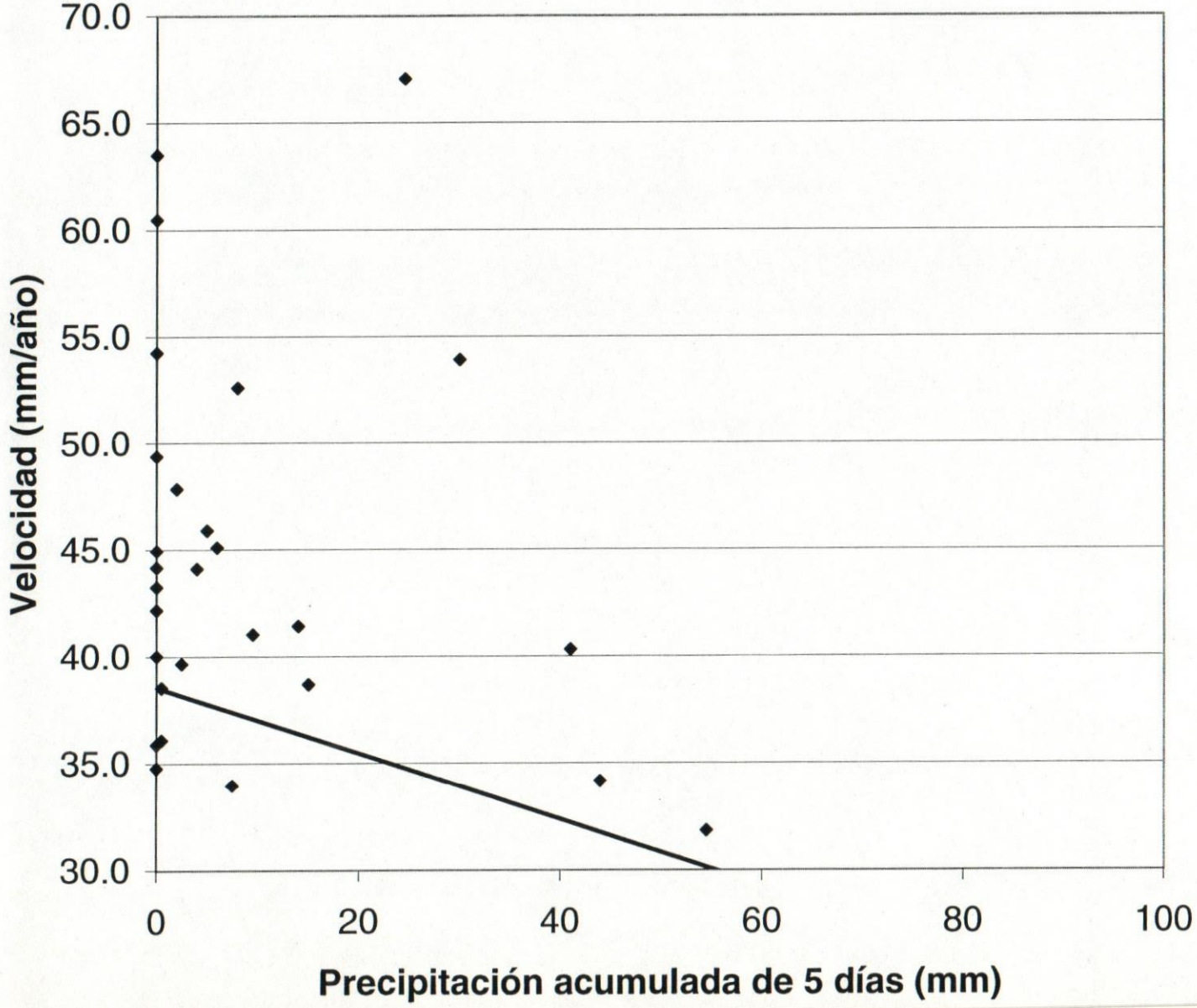
Inclinómetro IC-25



$y = 0.0014x + 39.062$

$R^2 = 5E\text{-}05$

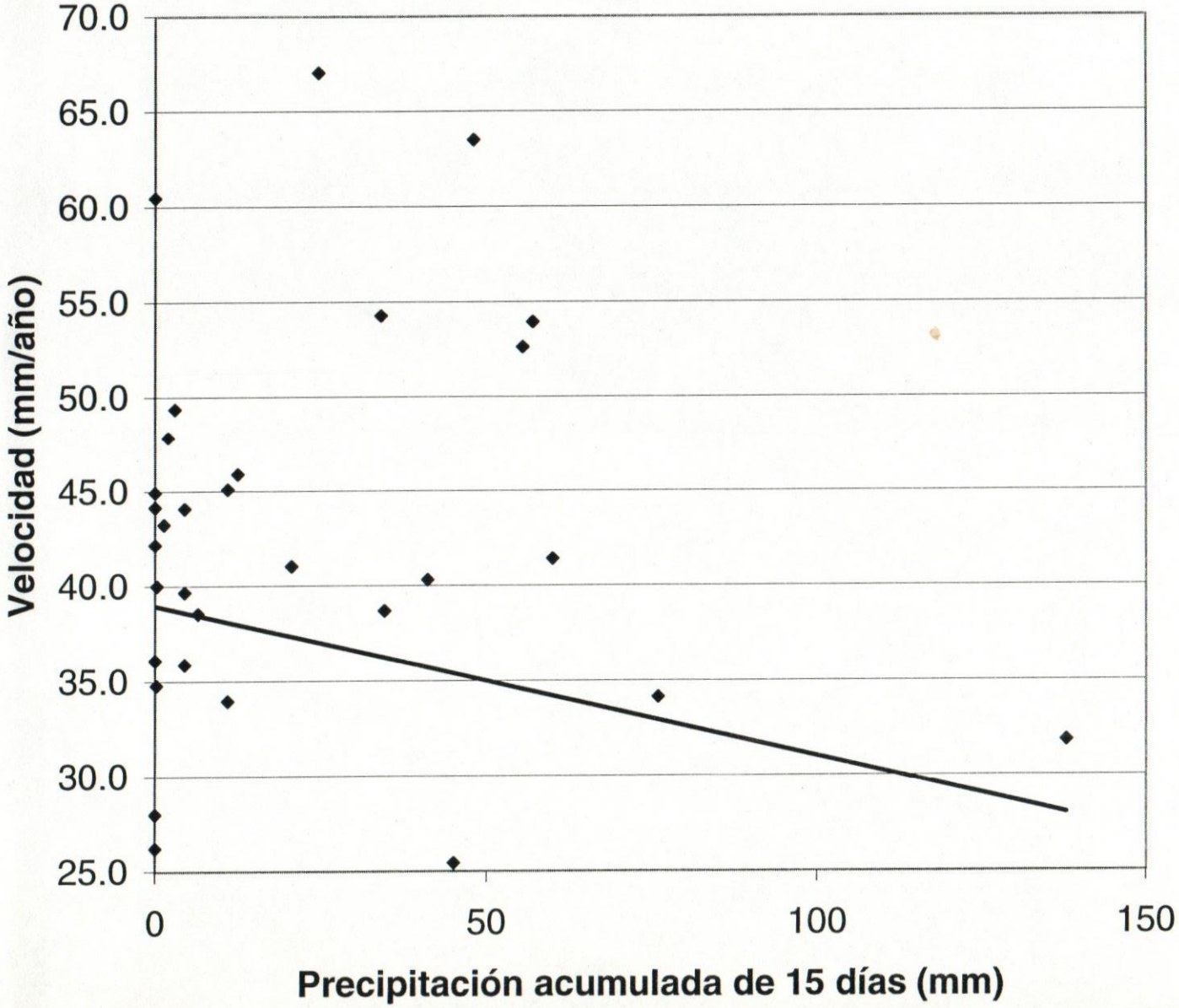
Inclinómetro IC-32



$y = -0.1545x + 38.554$

$R^2 = 0.0326$

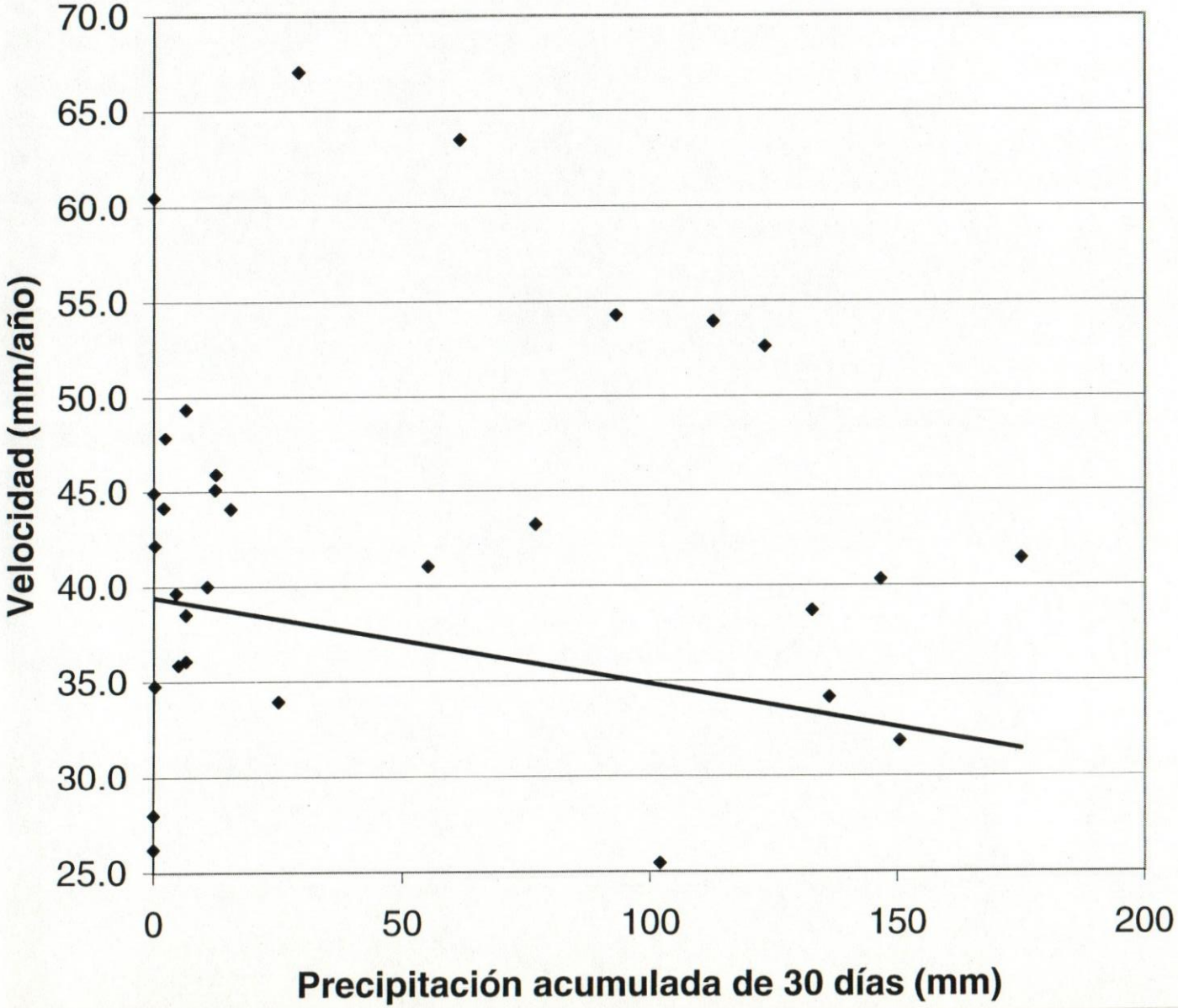
Inclinómetro IC-32



$y = -0.0794x + 38.964$

$R^2 = 0.0249$

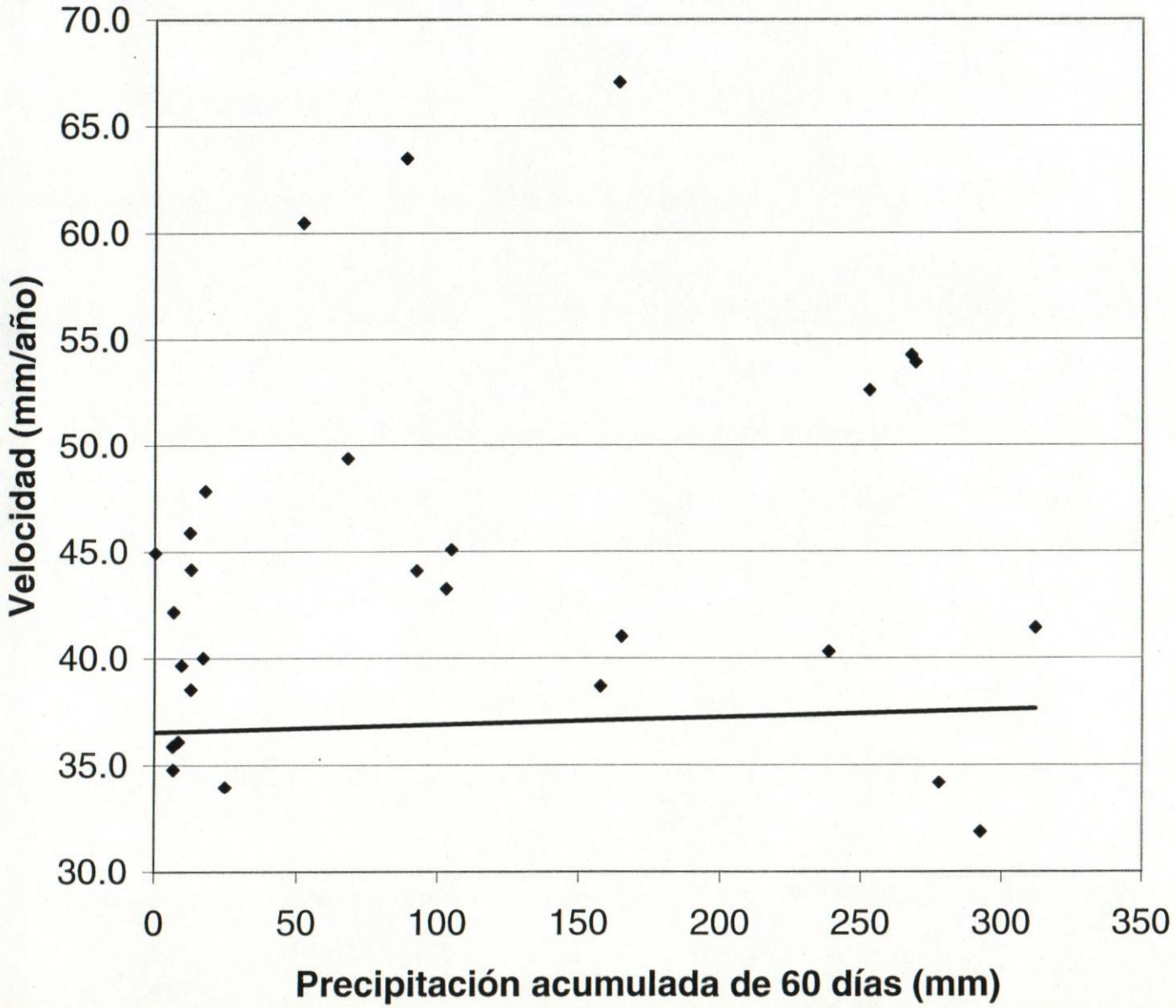
Inclinómetro IC-32



$y = -0.0458x + 39.438$

$R^2 = 0.0279$

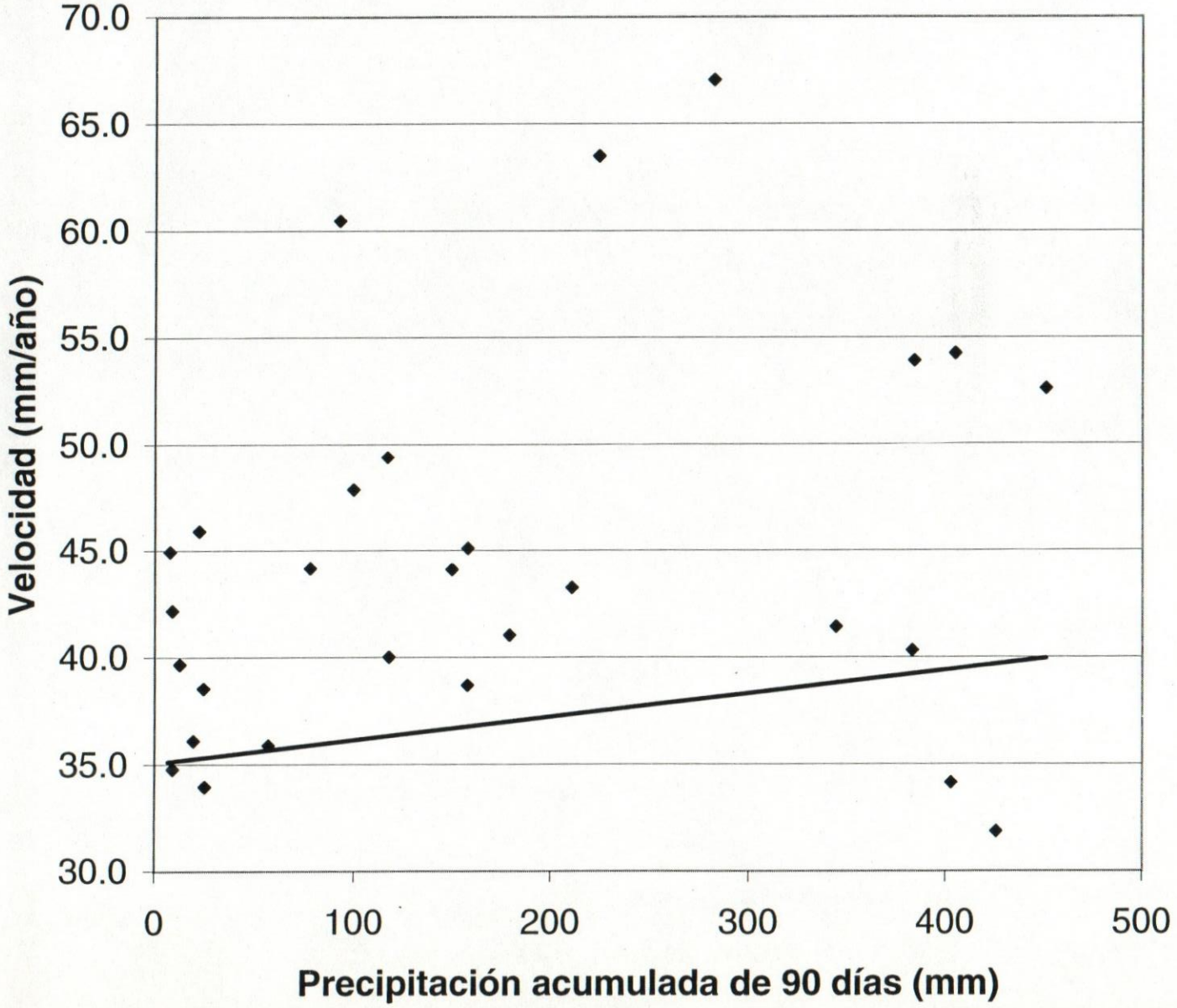
Inclinómetro IC-32



$y = 0.0035x + 36.544$

$R^2 = 0.0005$

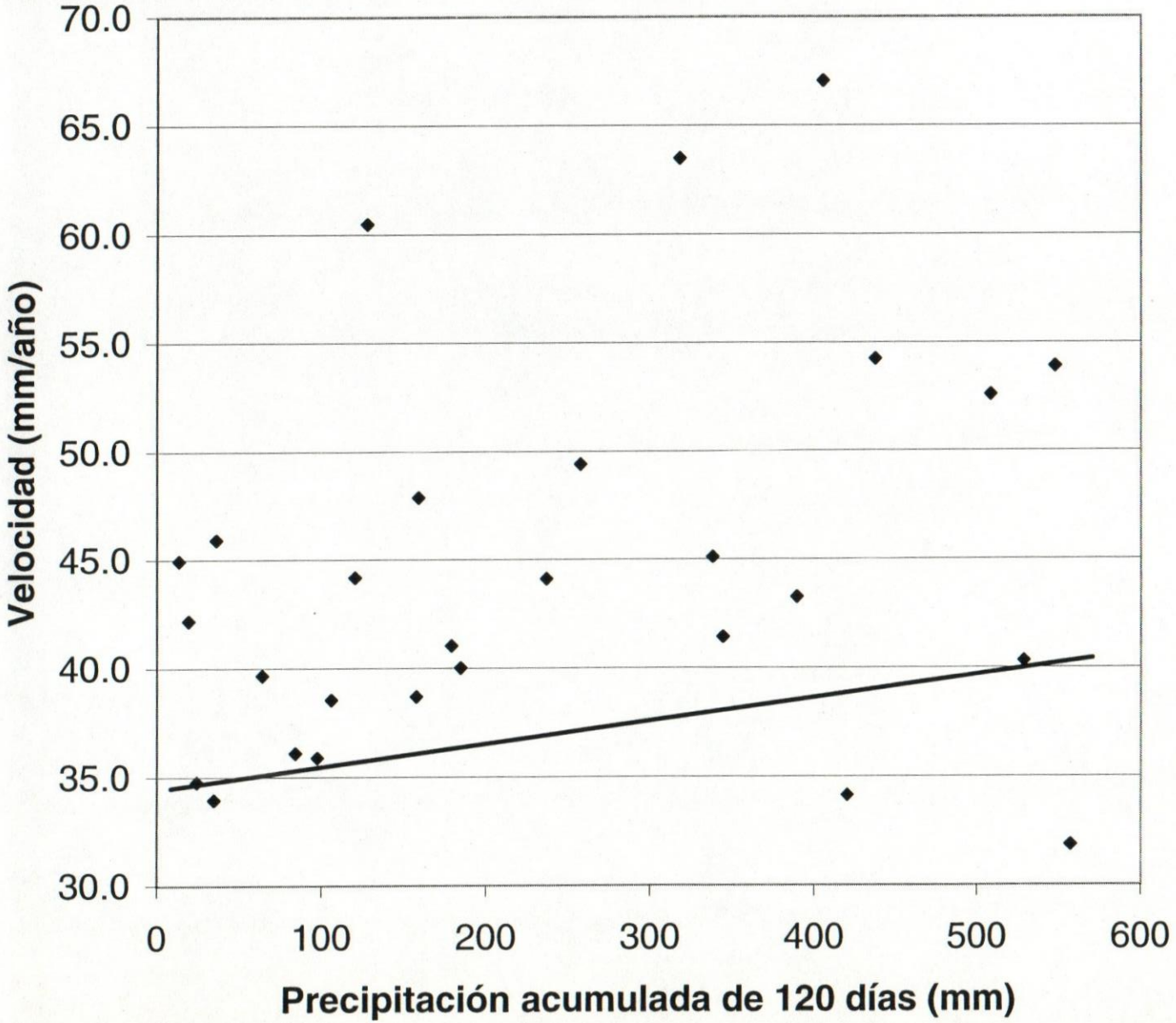
Inclinómetro IC-32



$y = 0.0109x + 35.049$

$R^2 = 0.01$

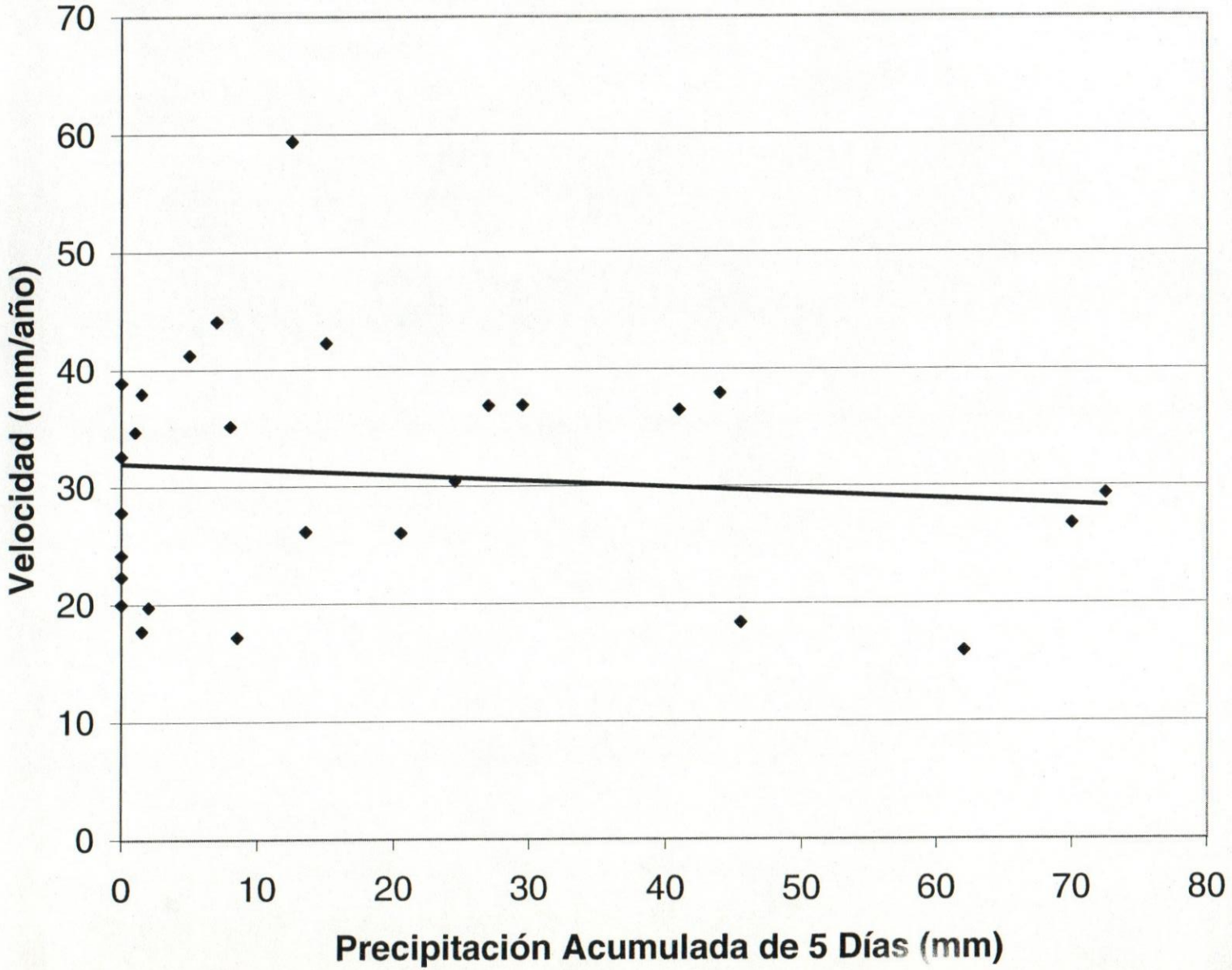
Inclinómetro IC-32



$y = 0.0105x + 34.414$

$R^2 = 0.0146$

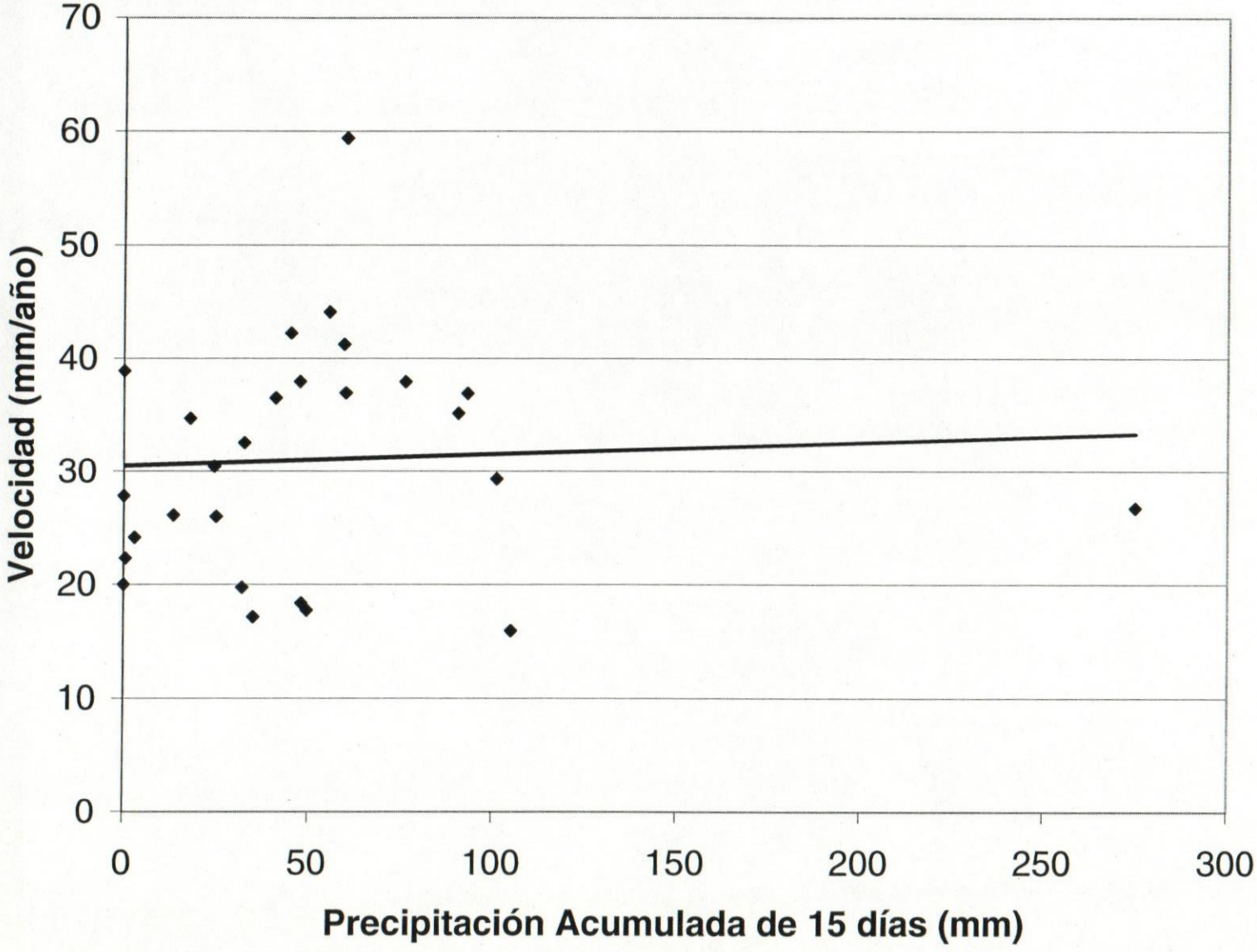
Inclinómetro IC-36



$y = -0.0509x + 31.976$

$R^2 = 0.0128$

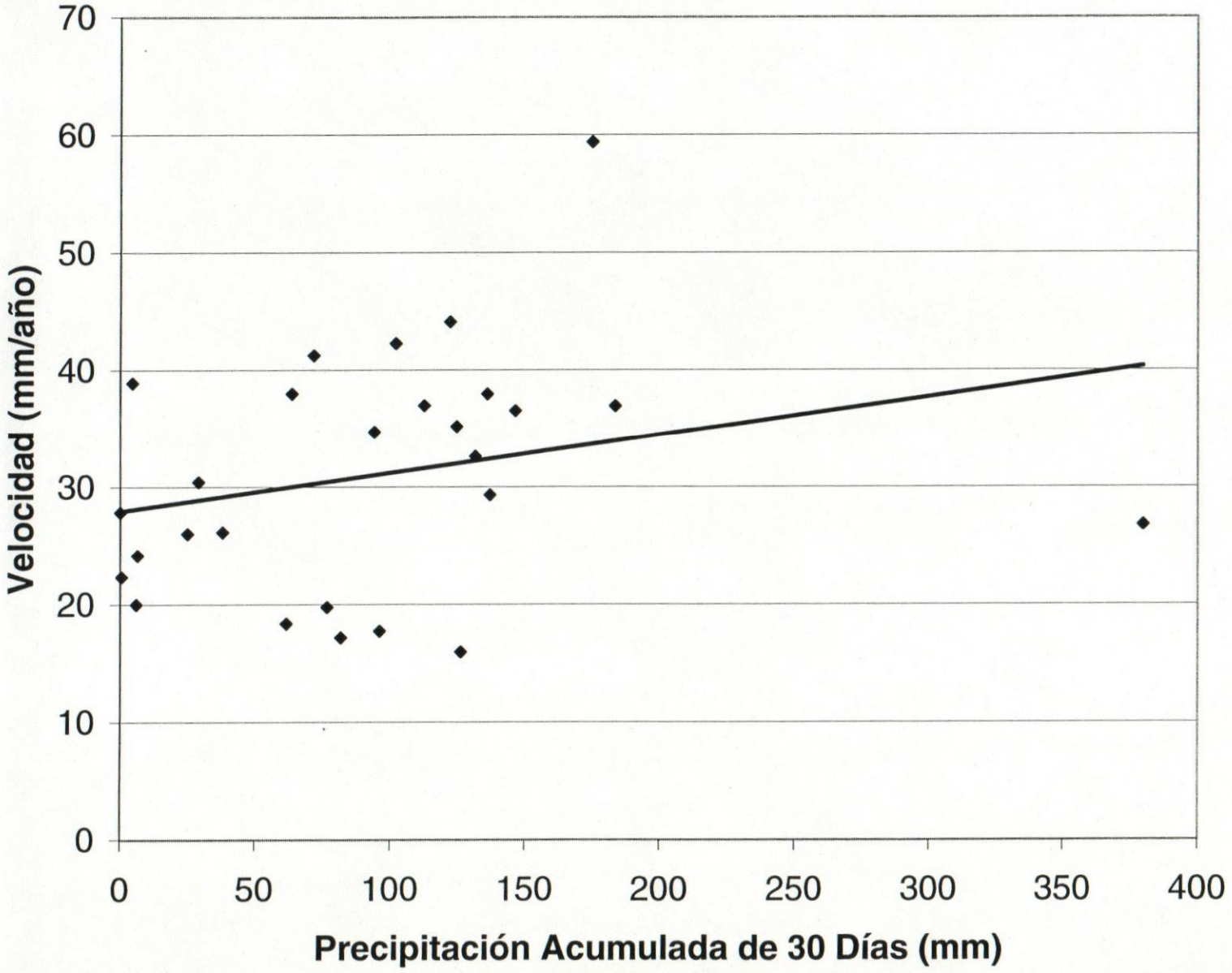
Inclinómetro IC-36



$y = 0.0103x + 30.479$

$R^2 = 0.003$

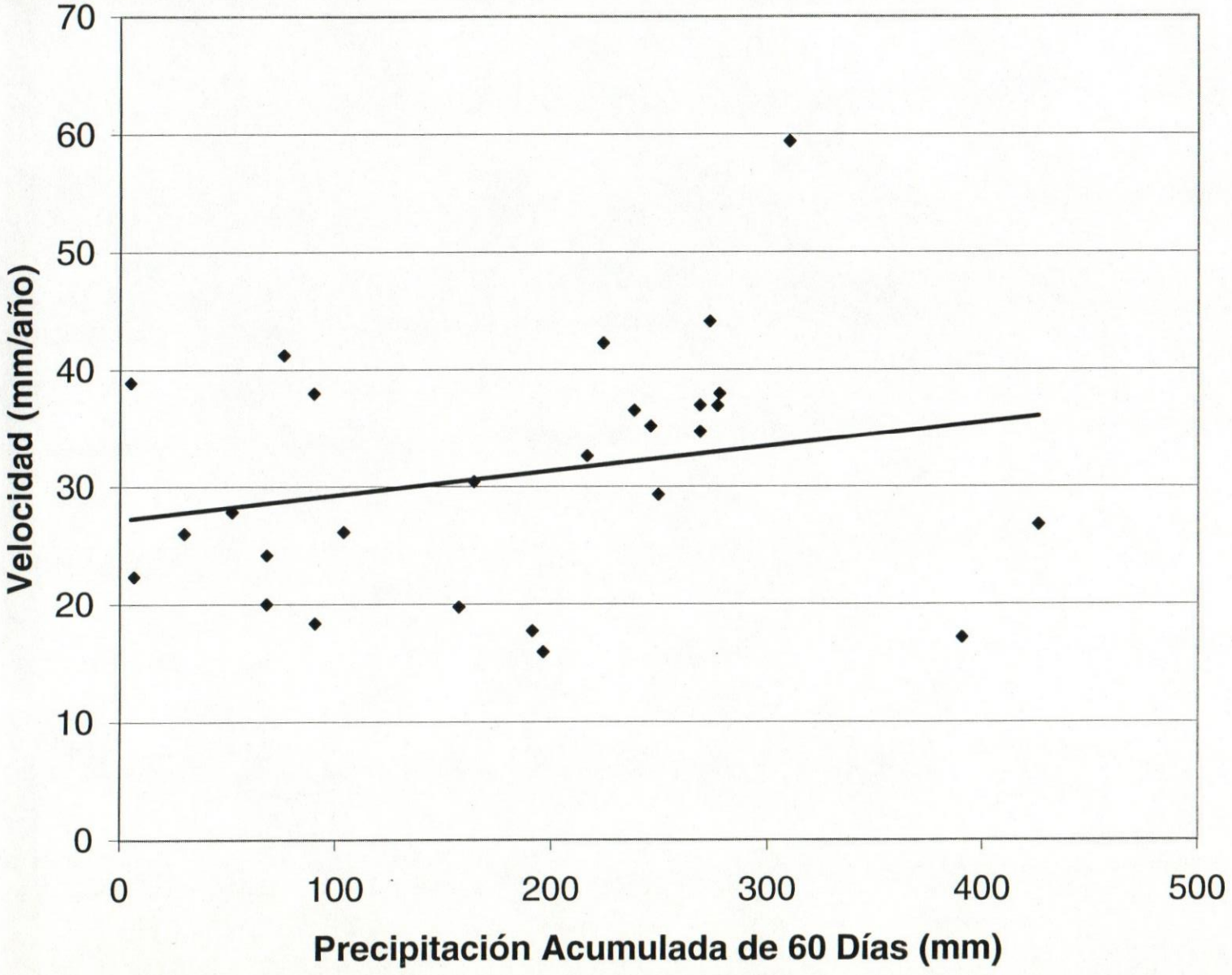
Inclinómetro IC-36



$y = 0.0326x + 27.953$

$R^2 = 0.0642$

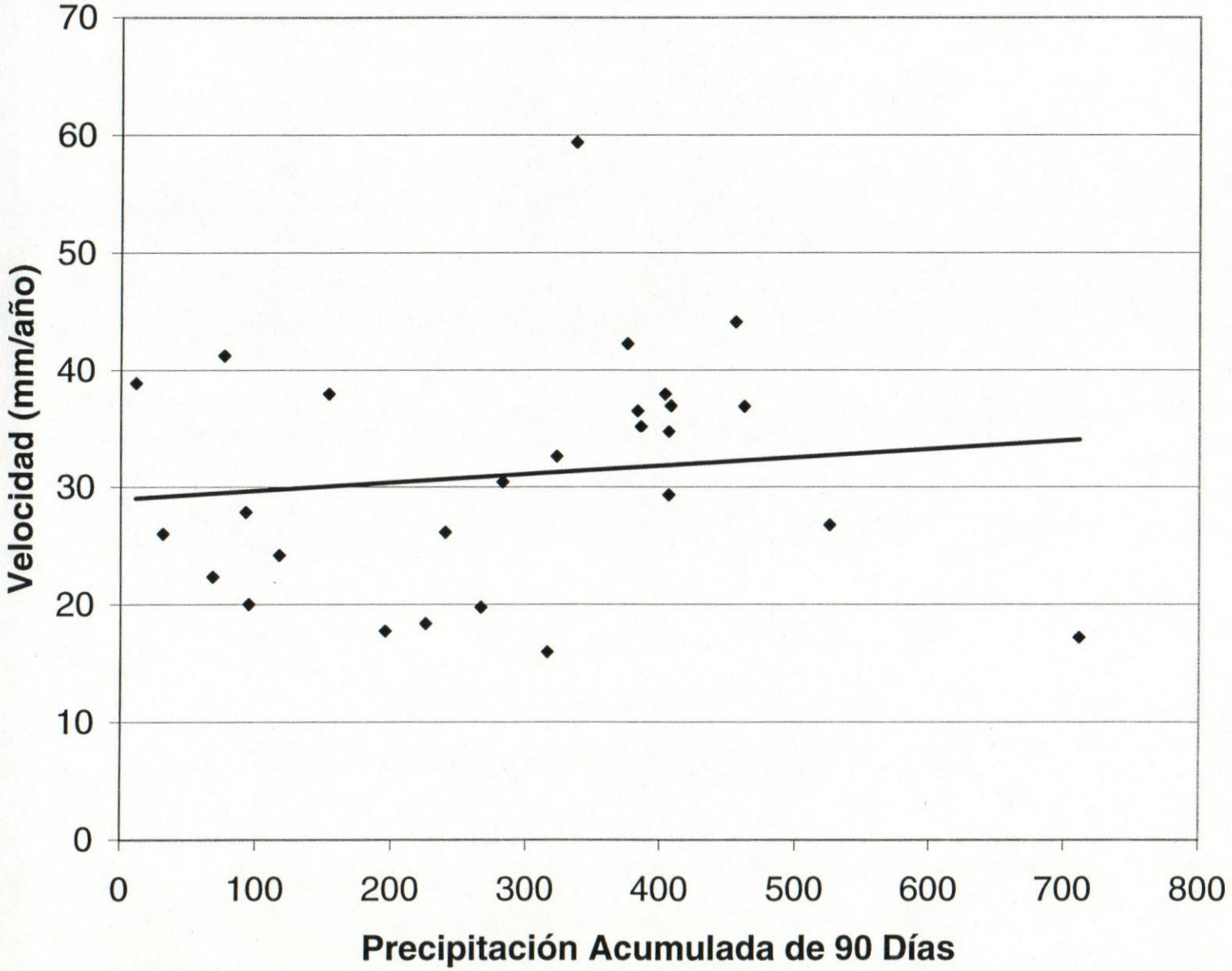
Inclinómetro IC-36



$y = 0.0209x + 27.176$

$R^2 = 0.0545$

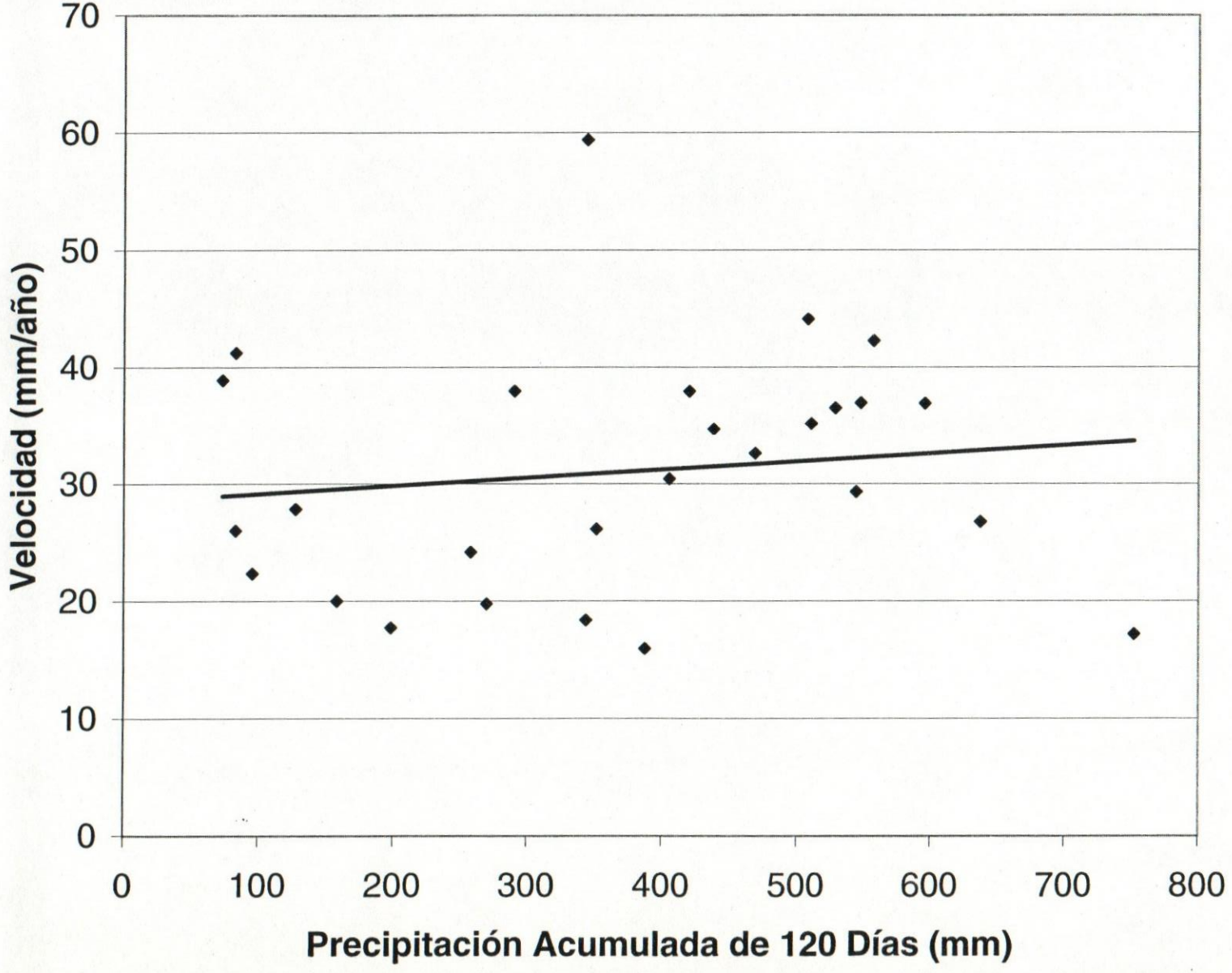
Inclinómetro IC-36



$y = 0.0071x + 28.975$

$R^2 = 0.014$

Inclinómetro IC-36



$y = 0.0069x + 28.461$

$R^2 = 0.0165$

Anexo C – Gráficas "Precipitación Acumulada vs. Nivel Piezométrico"

1. Correlación Precipitación – Nivel Piezométrico

PC-7P
Período (04/94-01/98)

Días Prec. Acum.	Factor R2
5	0.0175
15	0.0639
30	0.0528
60	0.0737
90	0.1192
120	0.2264

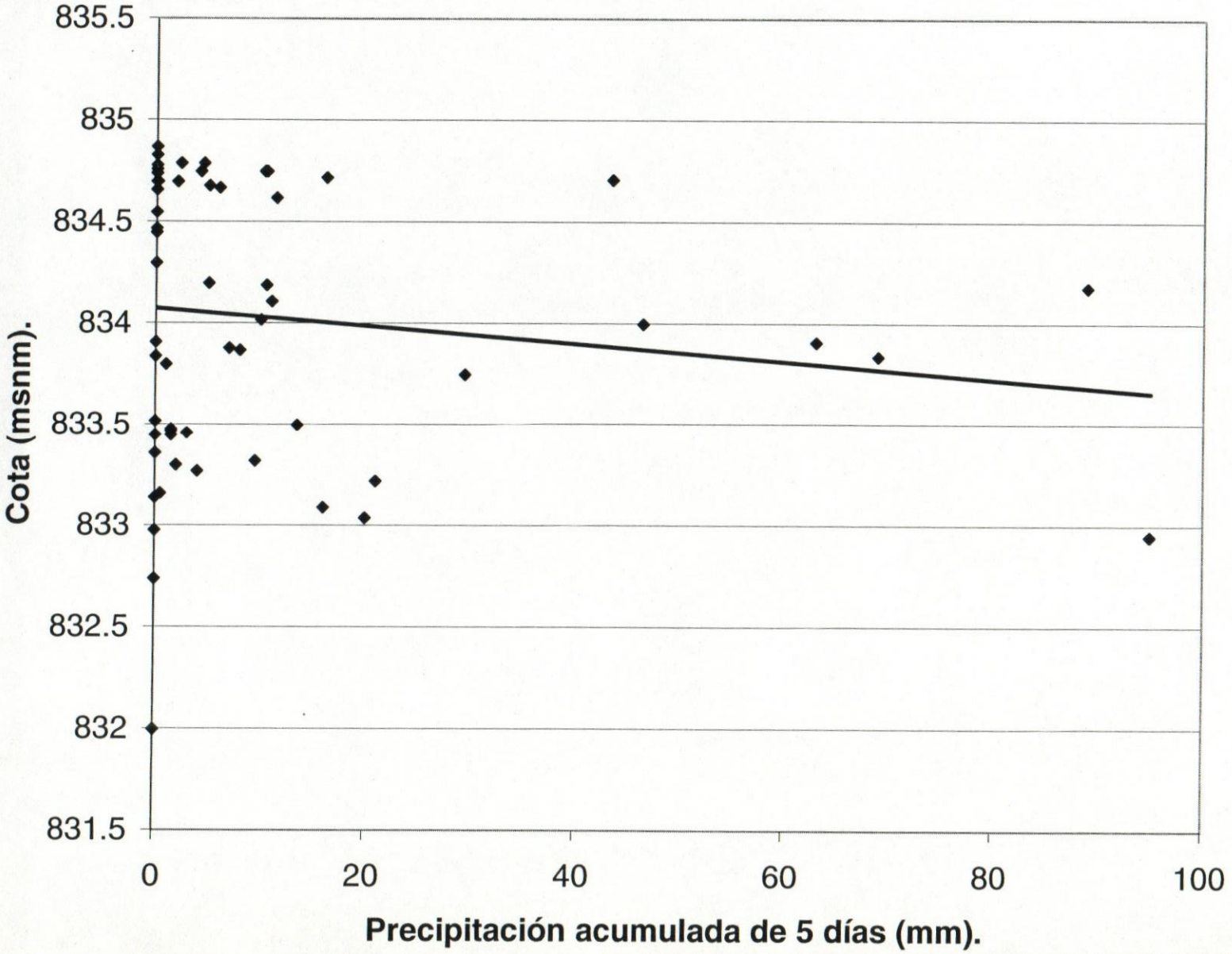
PC-16P
Período (04/94-01/98)

Días Prec. Acum.	Factor R2
5	0.0121
15	0.0429
30	0.0389
60	0.0847
90	0.1814
120	0.3184

PC-17P
Período (04/94-01/98)

Días Prec. Acum.	Factor R2
5	0.0496
15	0.0497
30	0.0752
60	0.1111
90	0.1687
120	0.2081

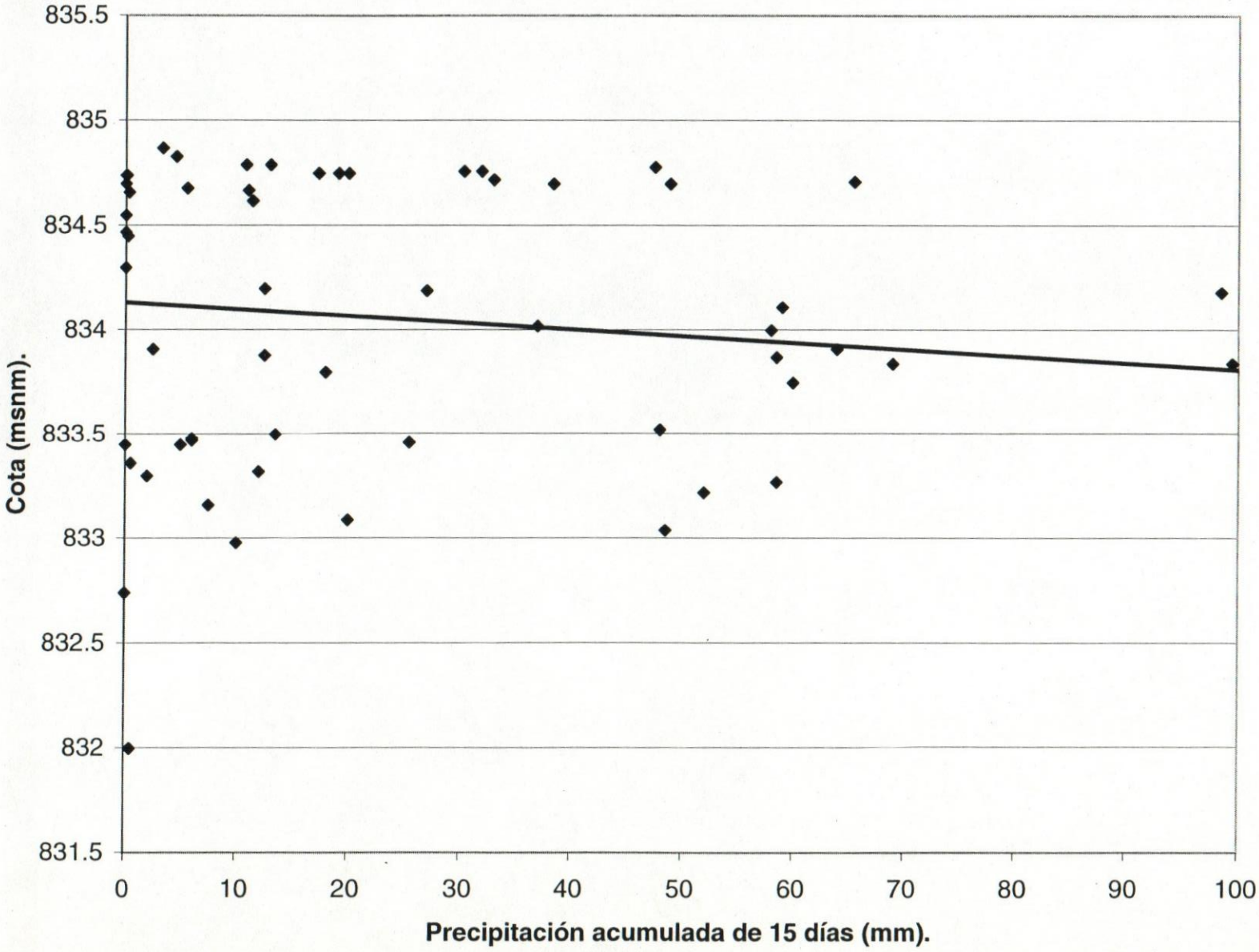
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0044x + 834.07$

$R^2 = 0.0175$

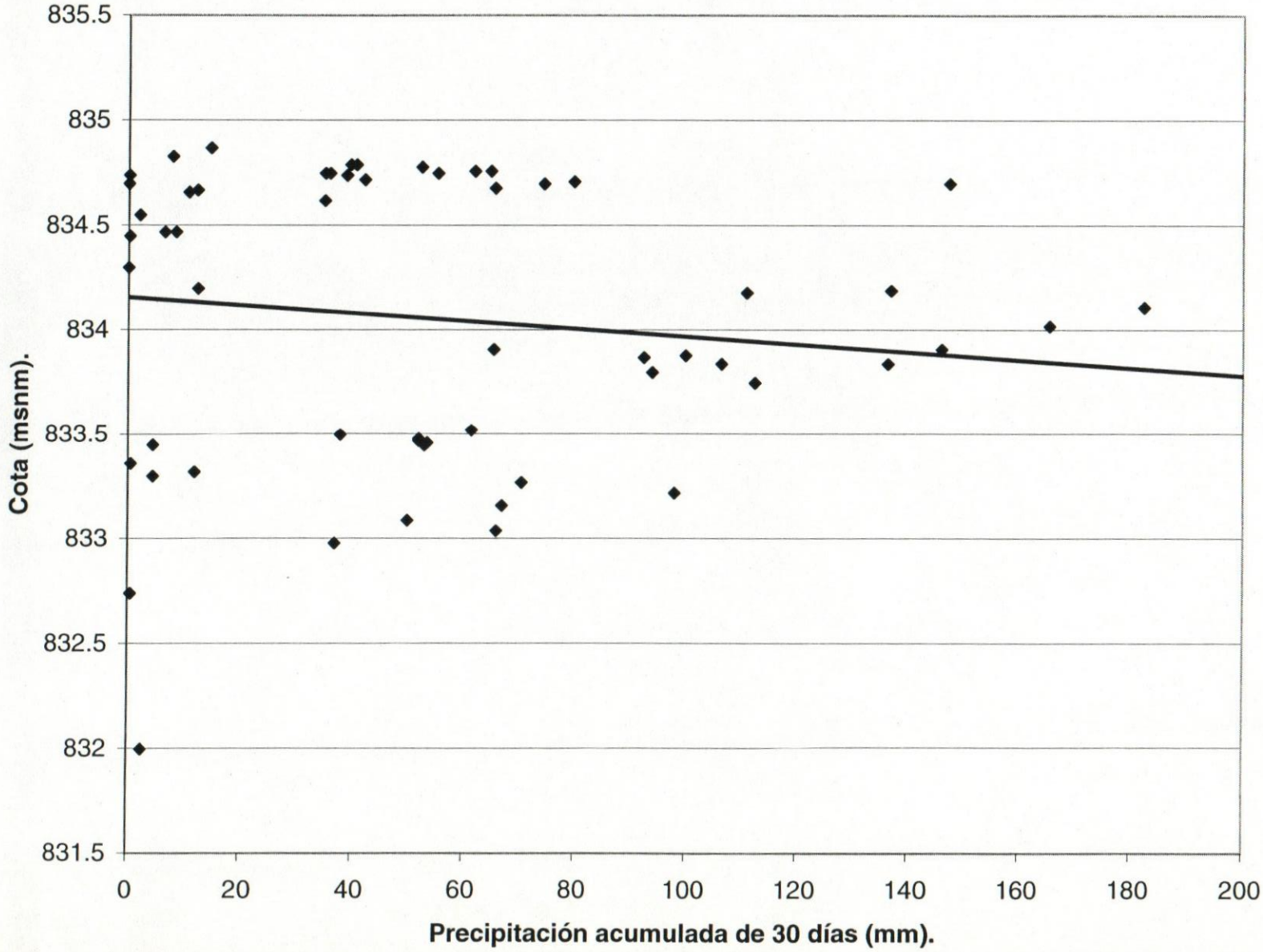
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0032x + 834.13$

$R^2 = 0.0639$

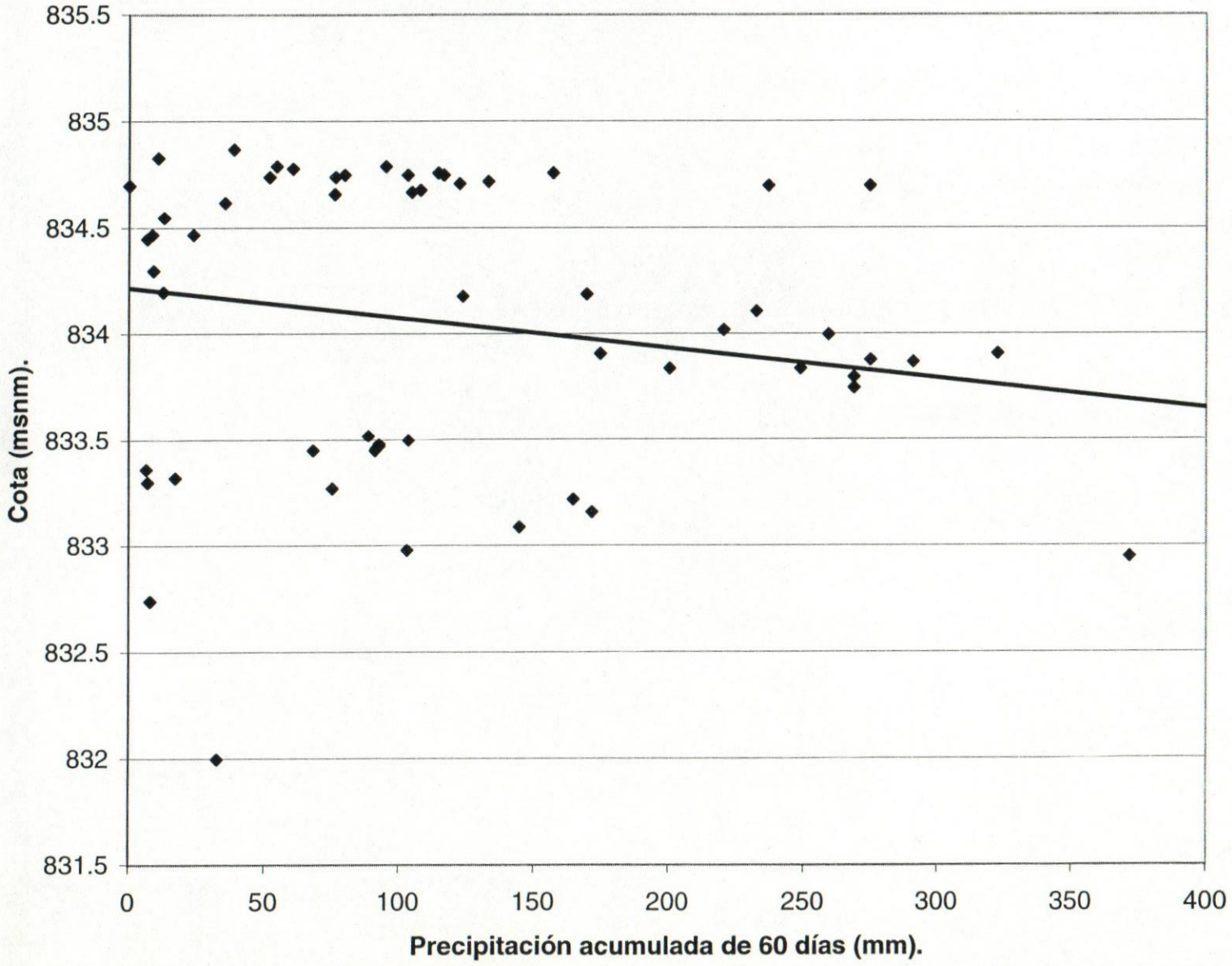
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0019x + 834.16$

$R^2 = 0.0528$

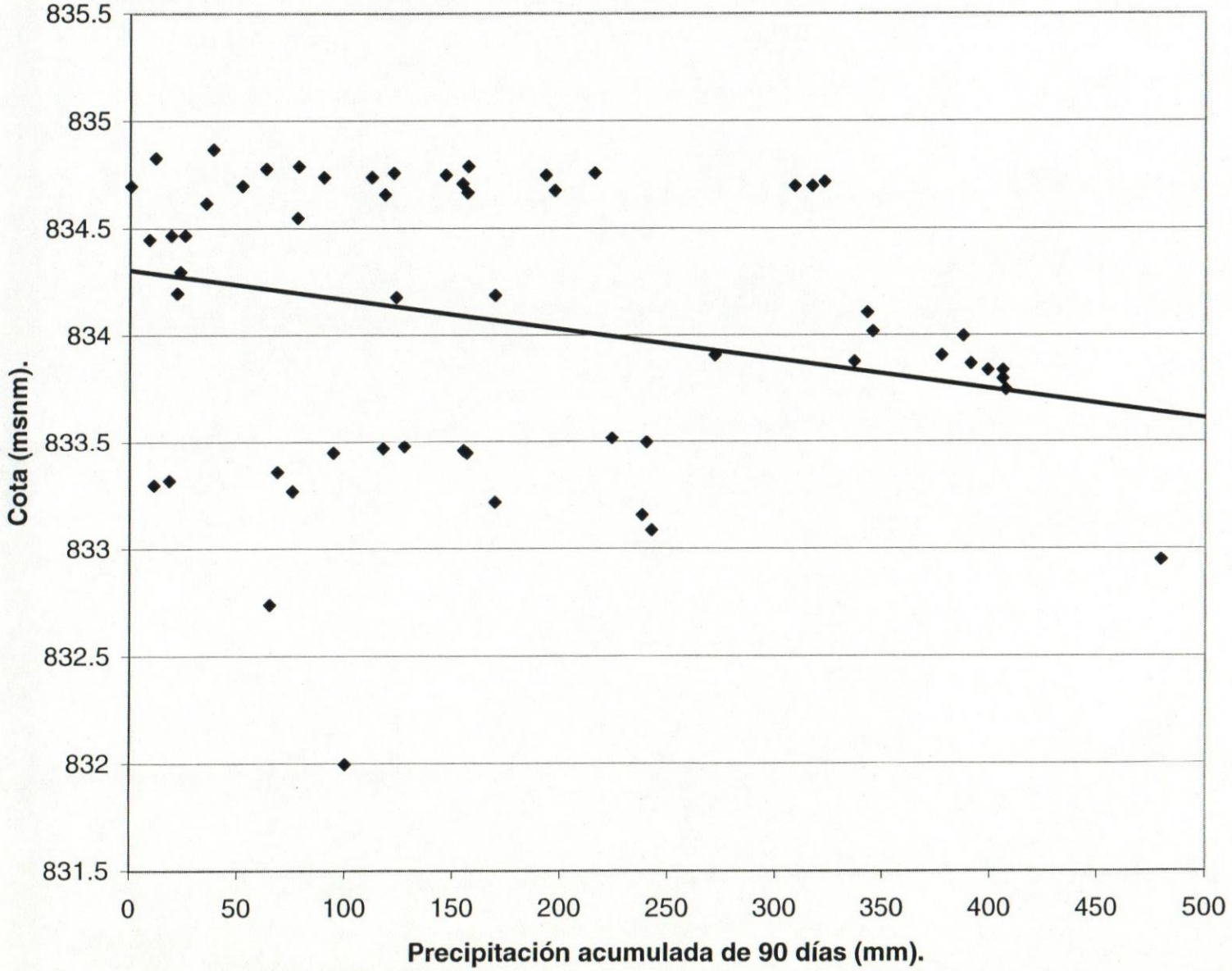
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0014x + 834.22$

$R^2 = 0.0737$

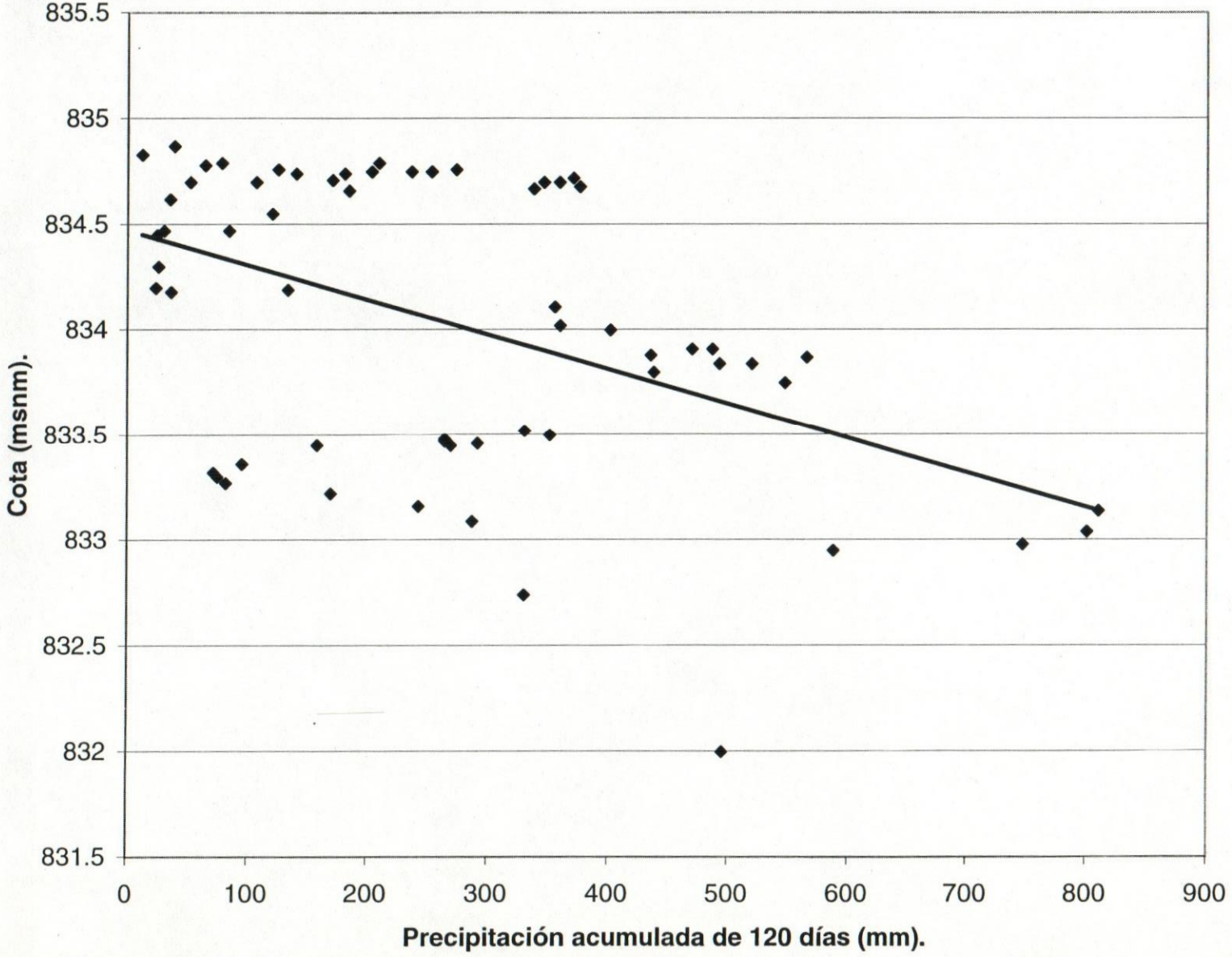
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0014x + 834.31$

$R^2 = 0.1192$

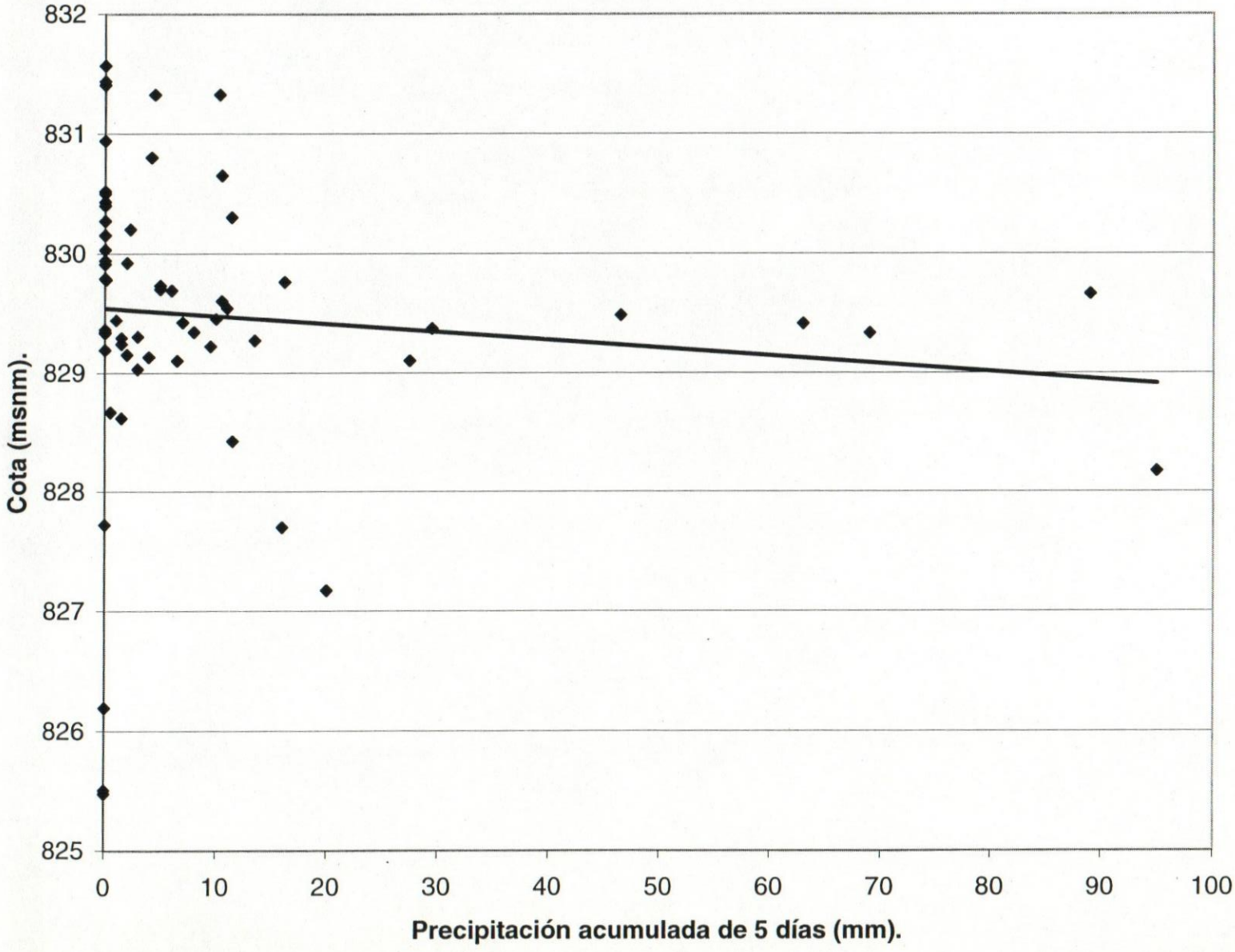
Piezómetro PC-7P



$y = -0.0016x + 834.47$

$R^2 = 0.2264$

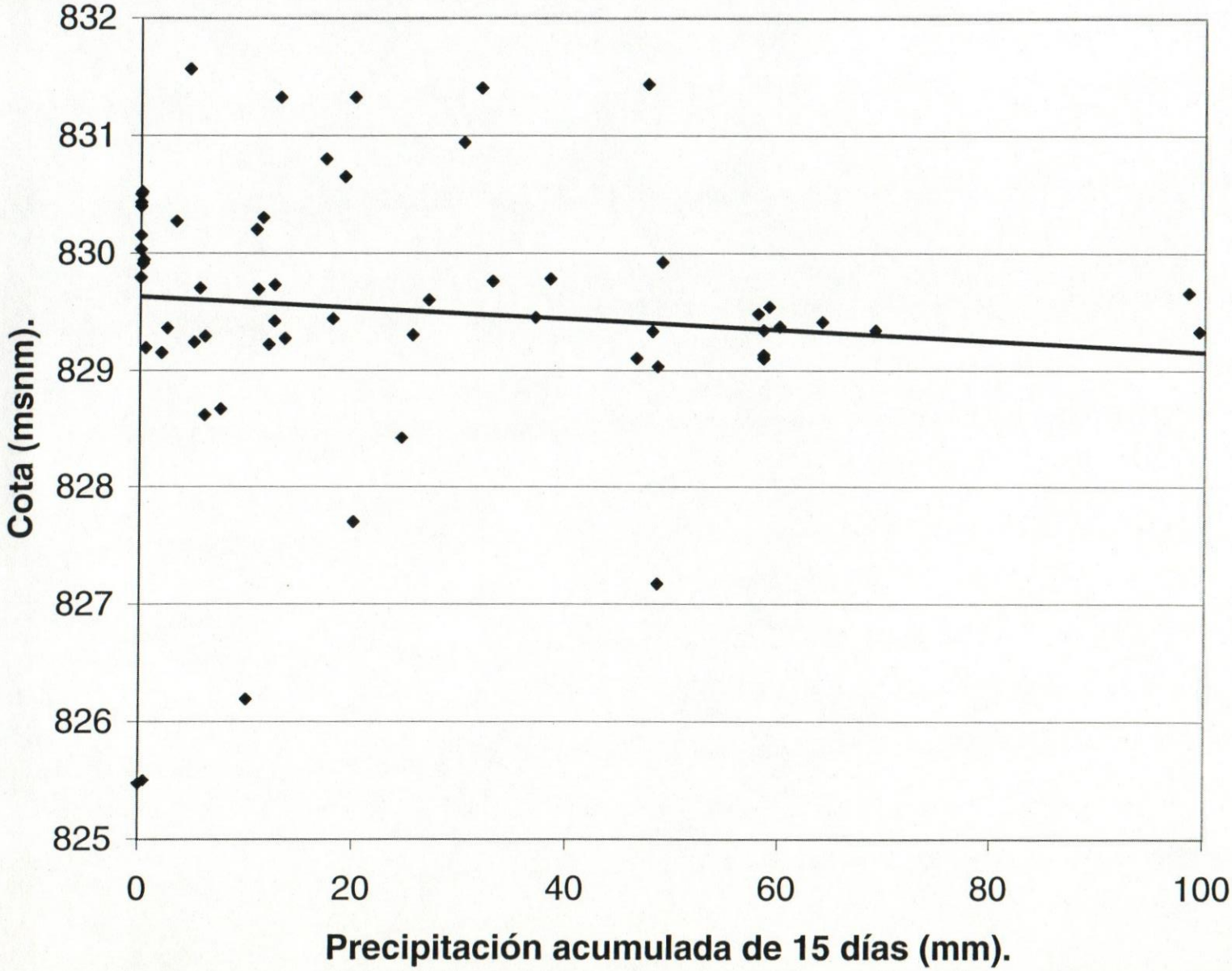
Piezómetro PC-16P



$y = -0.0066x + 829.54$

$R^2 = 0.0121$

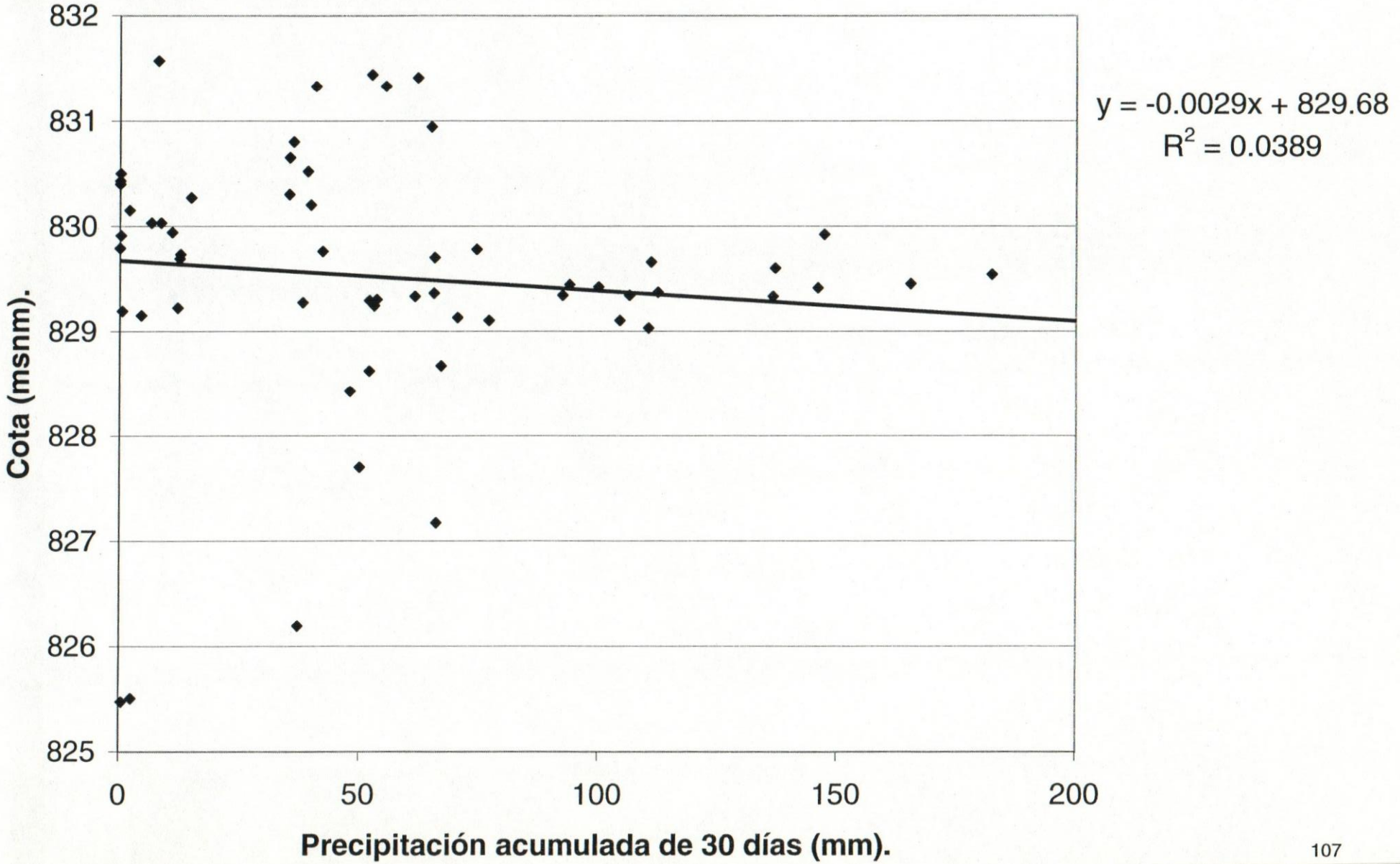
Piezómetro PC-16P



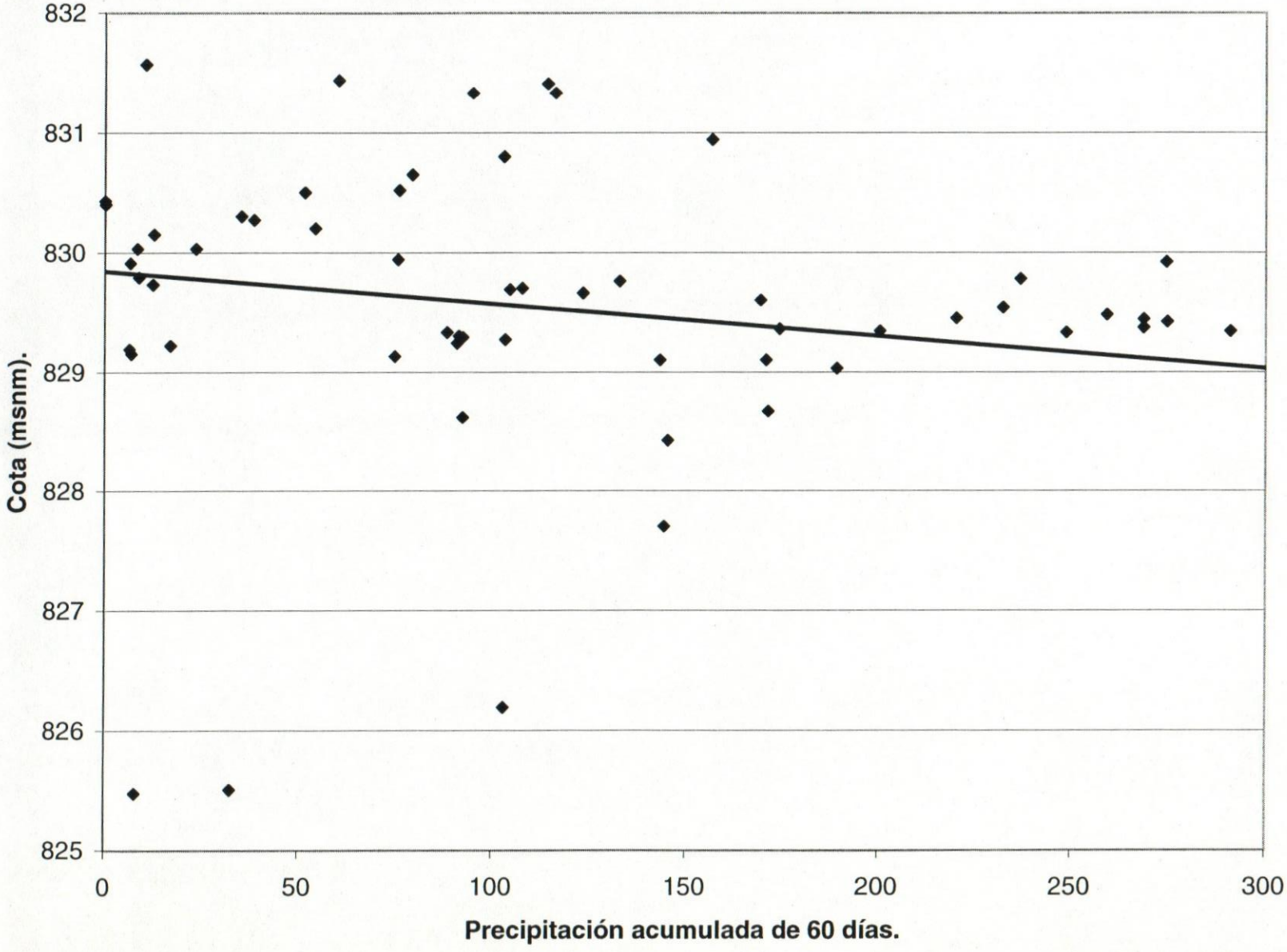
$y = -0.0048x + 829.63$

$R^2 = 0.0429$

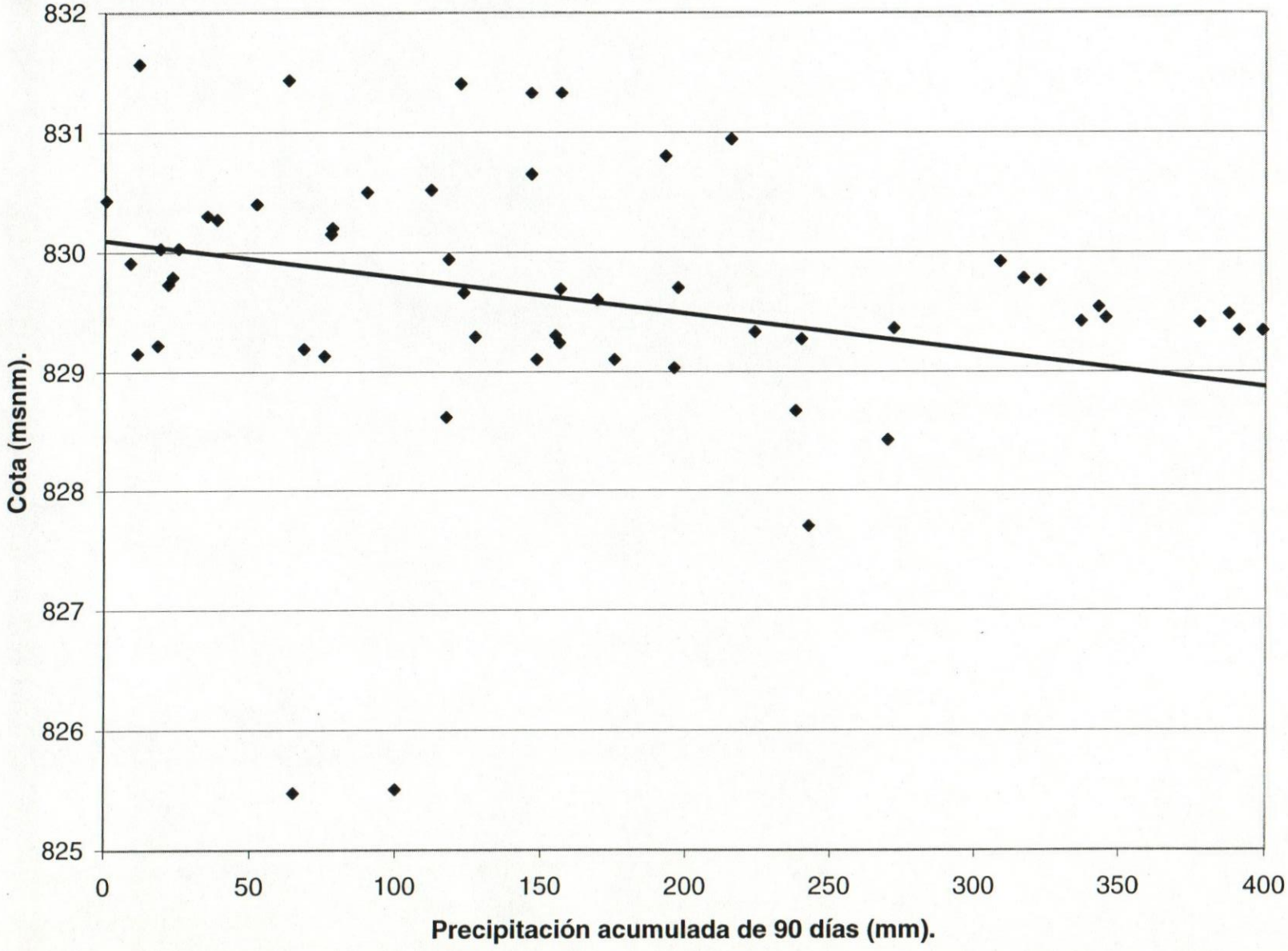
Piezómetro PC-16P



Piezómetro PC-16P



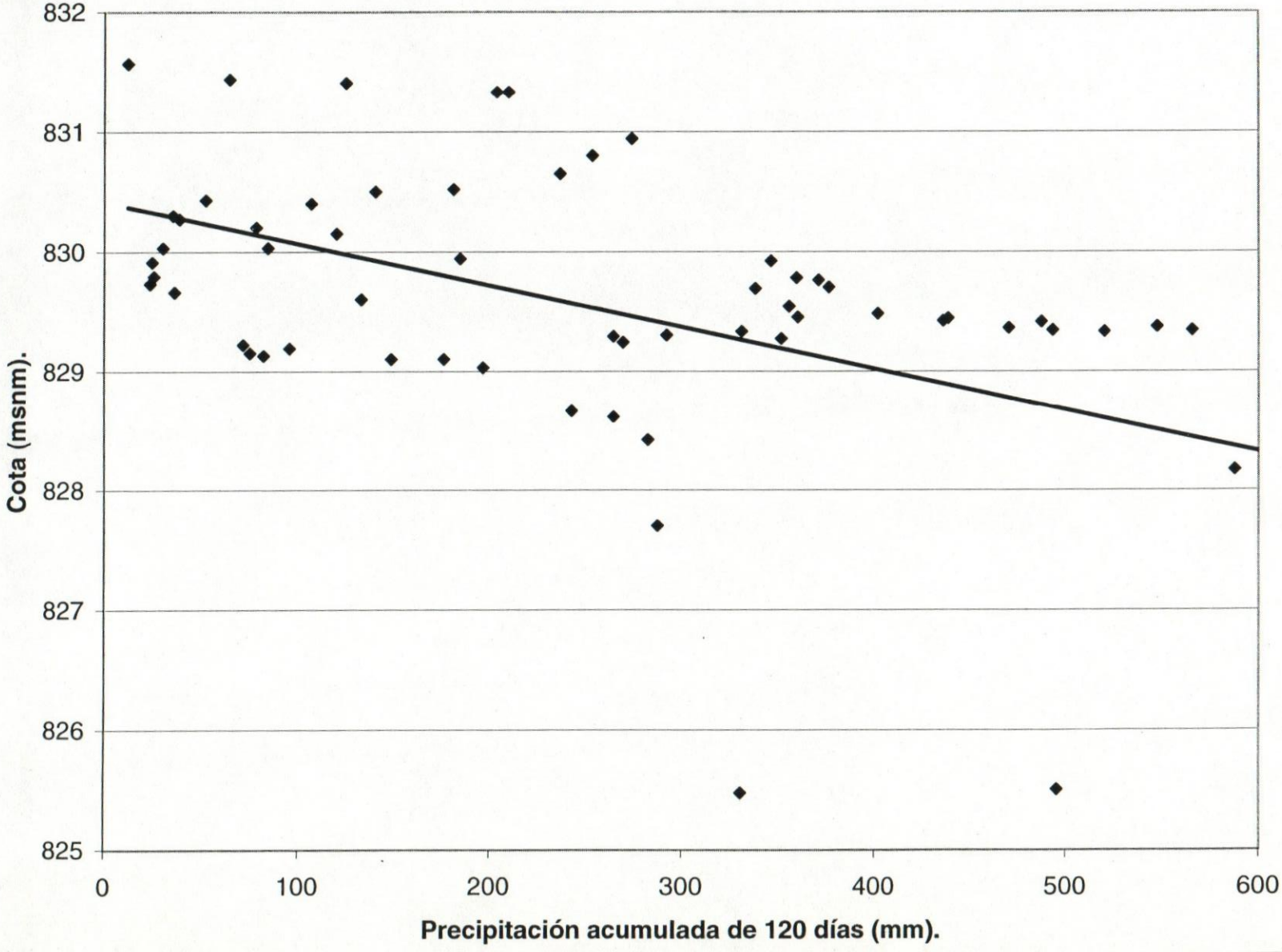
Piezómetro PC-16P



$y = -0.0031x + 830.1$

$R^2 = 0.1814$

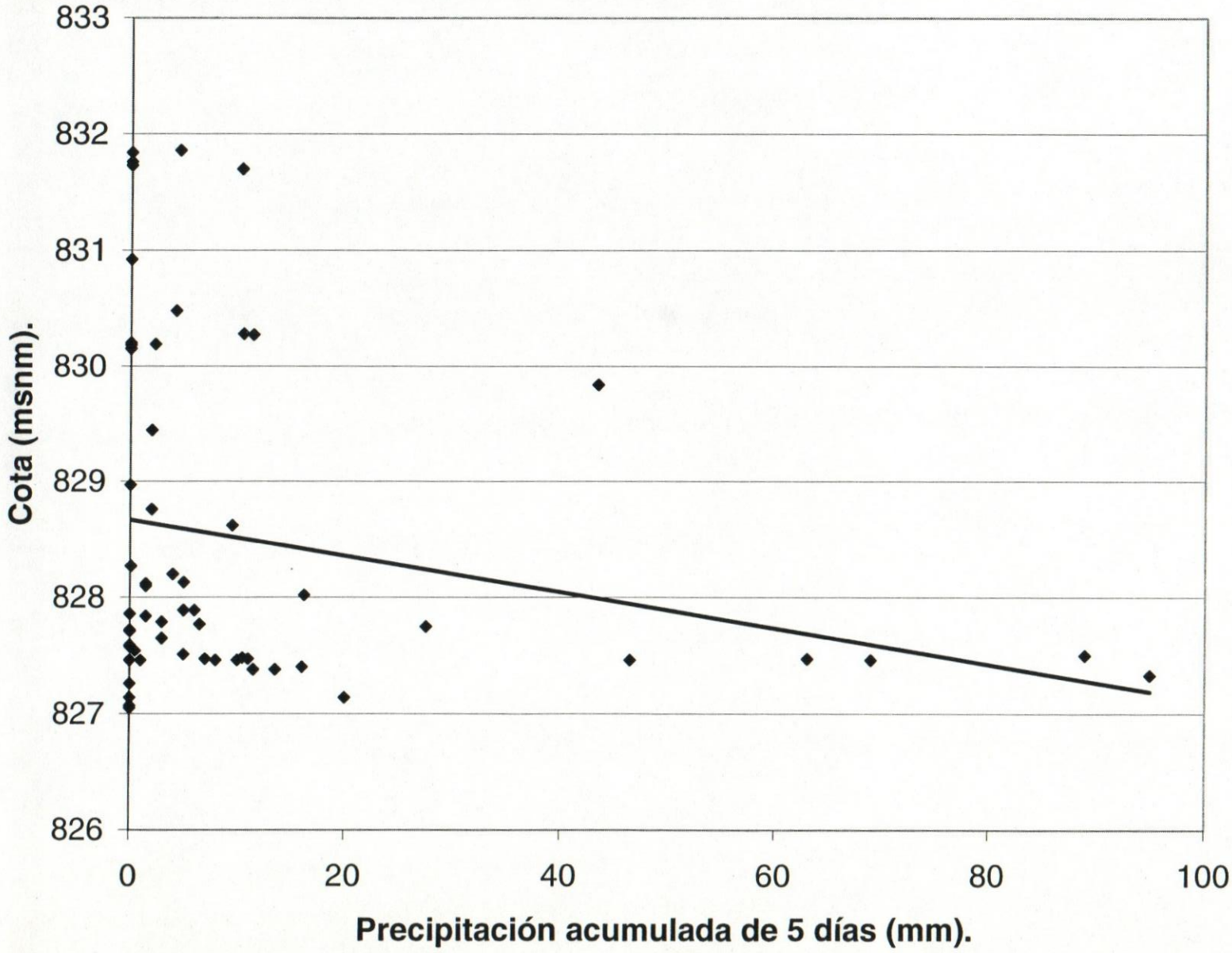
Piezómetro PC-16P



$y = -0.0035x + 830.42$

$R^2 = 0.3184$

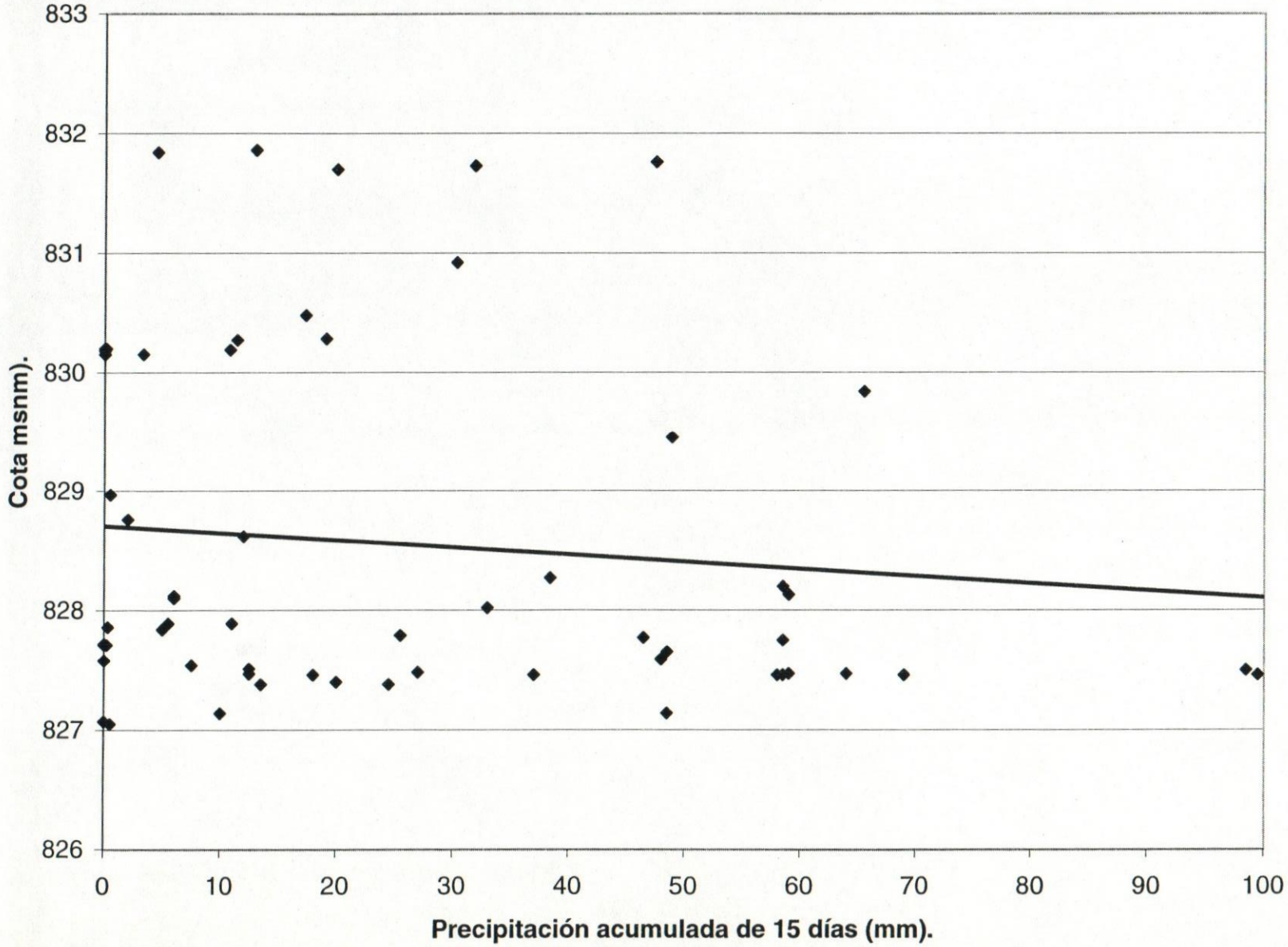
Piezómetro PC-17P



$y = -0.0156x + 828.67$

$R^2 = 0.0496$

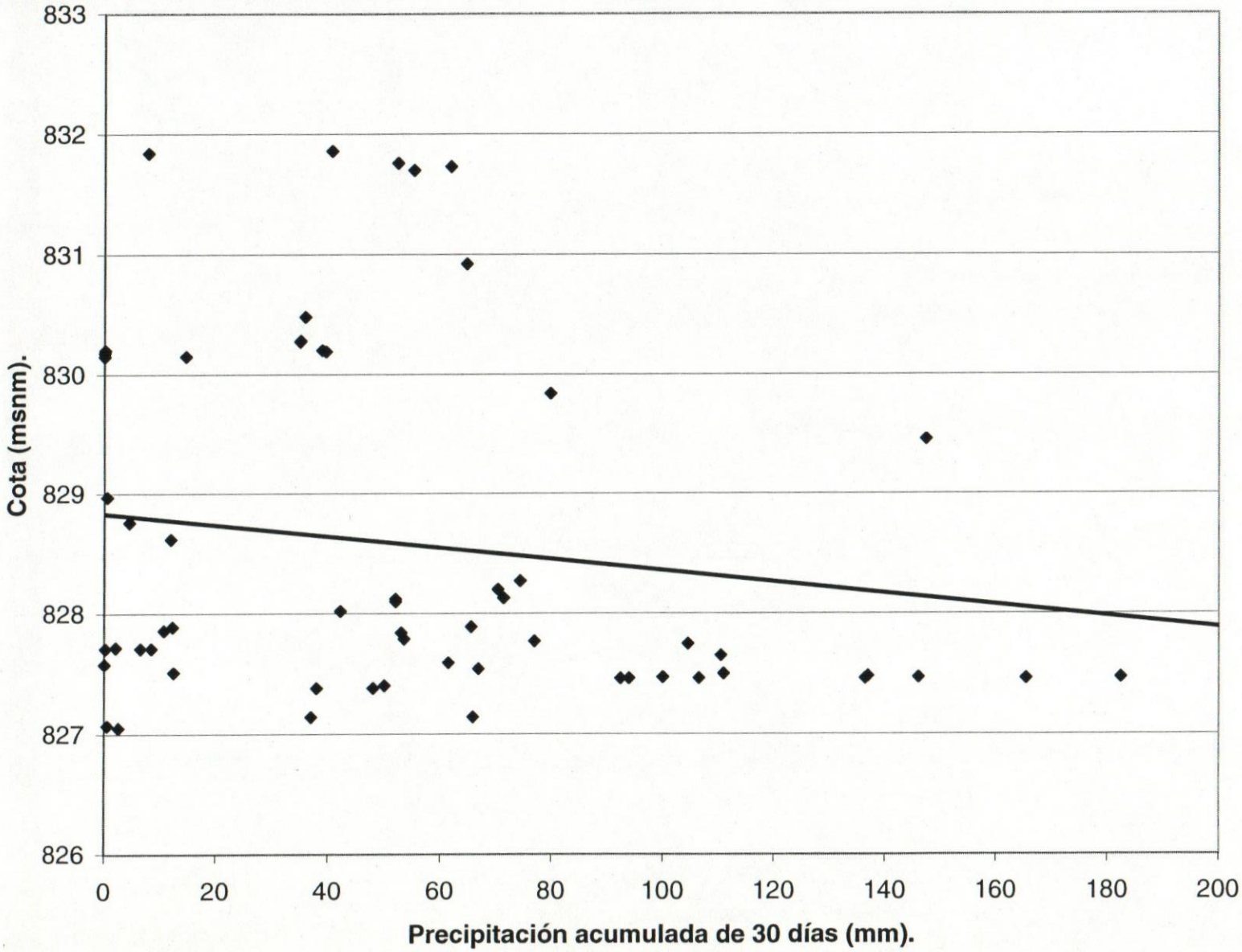
Piezómetro PC-17P



$y = -0.006x + 828.71$

$R^2 = 0.0497$

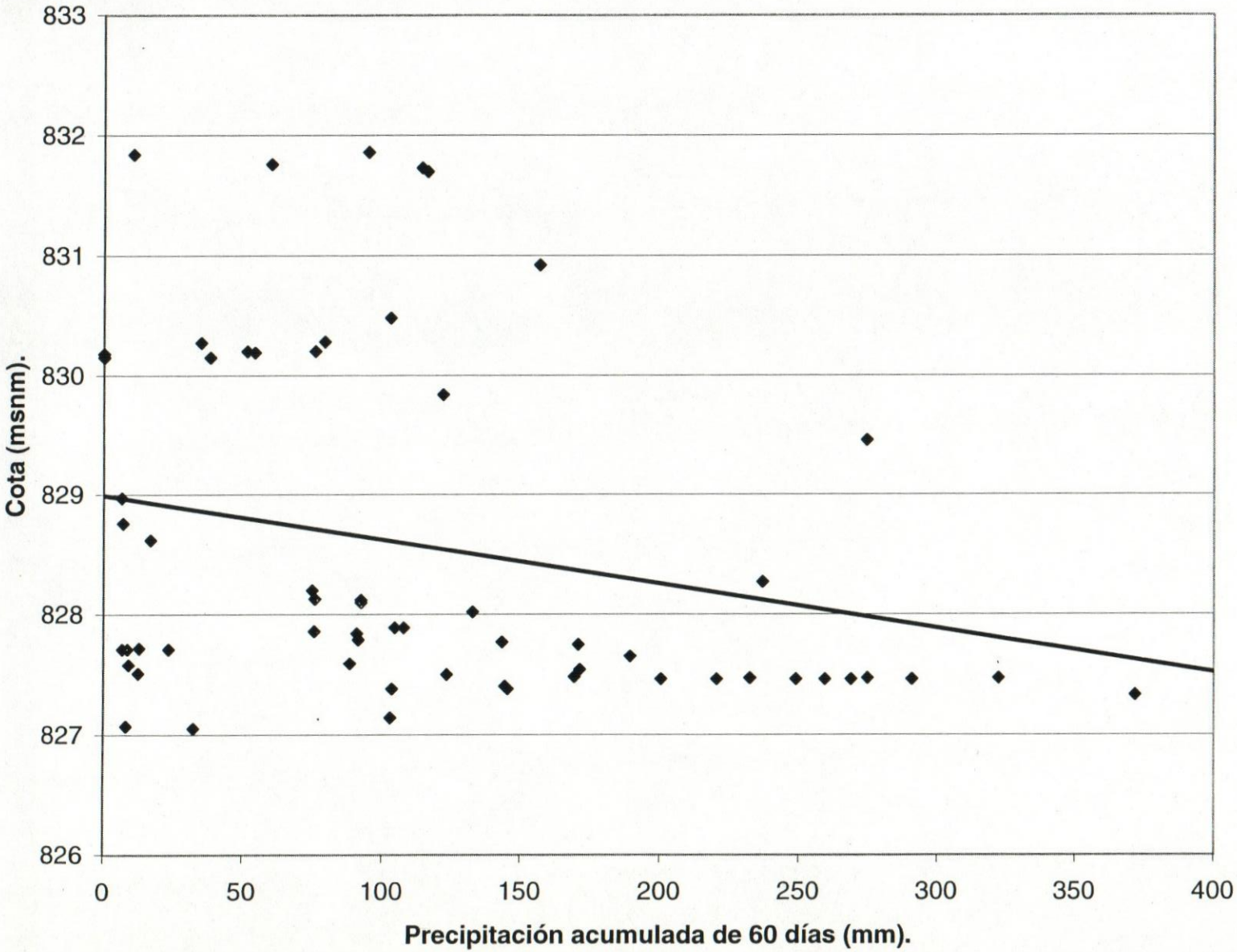
Piezómetro PC-17P



$y = -0.0047x + 828.83$

$R^2 = 0.0752$

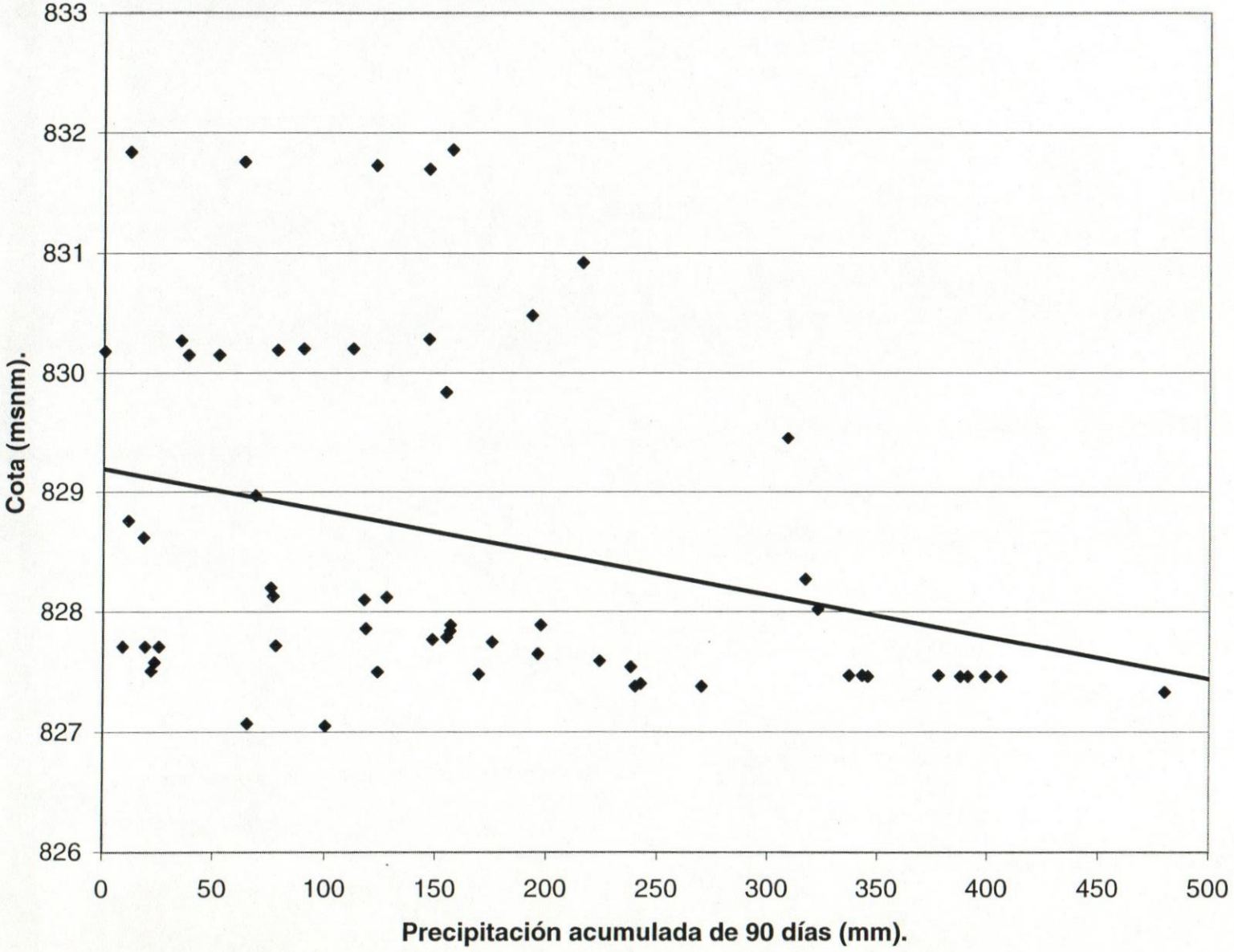
Piezómetro PC-17P



$y = -0.0037x + 828.99$

$R^2 = 0.1111$

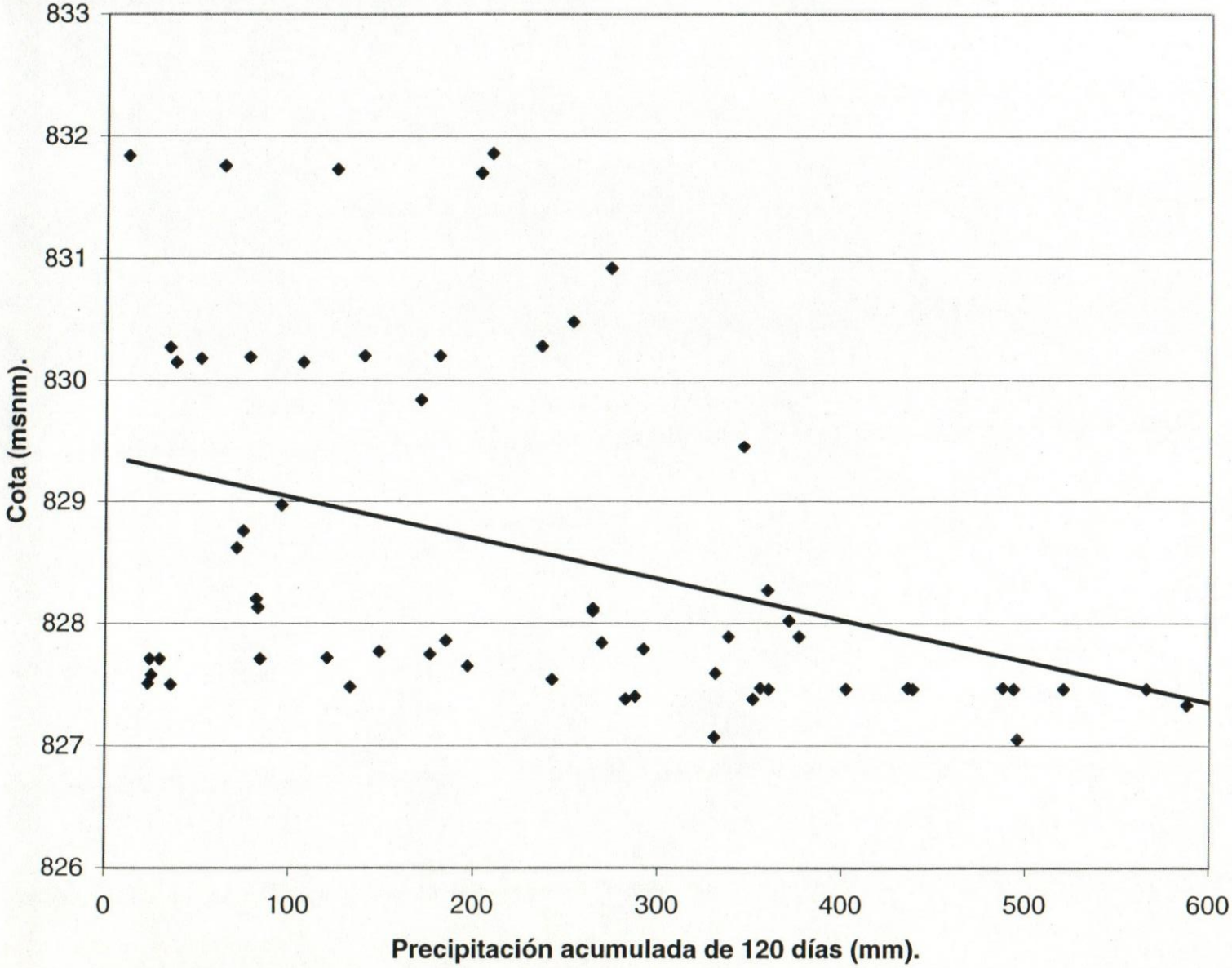
Piezómero PC-17P



$y = -0.0035x + 829.19$

$R^2 = 0.1687$

Piezómetro PC-17P



$y = -0.0034x + 829.38$

$R^2 = 0.2081$